

TESIS DOCTORAL

Evolución temporal de la vegetación en el Sahel mediante el NDVI y su relación con la precipitación en el periodo 1983-2012

Autora:

Carolina Puig Polo

Directores:

Dr. Javier Martín Vide

Dr. Felipe Buill Pozuelo

Barcelona, febrero de 2015



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH

**Departament d'Enginyeria del Terreny,
Cartogràfica i Geofísica**

Resumen

En el Sahel, la zona de transición entre el desierto del Sahara en el norte y la sabana húmeda tropical en el sur, el desarrollo y la prosperidad de la población depende en gran medida del régimen de lluvias. El clima se caracteriza por una estación seca y larga y una corta temporada de lluvias entre los meses de junio y septiembre. La lluvia está determinada por un fuerte gradiente de norte a sur con una precipitación escasa y variable en el norte, que se traduce en un continuo cambio de especies de vegetación y formas de vida que van desde arbustos espinosos de cobertura muy escasa intercalados entre pastos en el norte a una mayor cantidad de cobertura vegetal y especies leñosas en el sur. El crecimiento de la vegetación muestra fluctuaciones interanuales considerables que generan una preocupación generalizada en la población, predominantemente rural, ya que su modo de vida se basa principalmente en la agricultura de secano y el pastoreo.

Las graves sequías ocurridas durante la década de 1970, que se alargaron hasta mediados de la década siguiente, han sido ampliamente estudiadas tanto por sus graves consecuencias sobre la población, como porque se considera uno de los primeros signos de cambio climático global. El Sahel es la región donde se han evidenciado las mayores variaciones de precipitación y vegetación en las últimas tres o cuatro décadas.

Los avances tecnológicos en el campo de la teledetección han permitido la vigilancia de los ecosistemas gracias a la disponibilidad de datos con resoluciones espaciales, temporales y espectrales cada vez mejores.

En esta tesis se investigan los patrones temporales y espaciales de la vegetación y la variabilidad de las precipitaciones en el Sahel a través de las interrelaciones basadas en el análisis de series temporales del índice de vegetación normalizado (NDVI) en el periodo 1983-2012 y las estimaciones de precipitación procedentes de satélite. Mientras que la precipitación emerge como una causa dominante del aumento de la vegetación, hay evidencias de otros factores de carácter antropogénico superpuestos a la tendencia del clima.

Medir la precipitación en las regiones semiáridas sigue siendo un punto crítico por la gran variabilidad espacial y temporal de la misma, a esto hay que añadir que el número de estaciones meteorológicas disponibles es muy escaso en el Sahel. Los datos de satélite, en combinación con las mediciones de las estaciones meteorológicas, son actualmente el mejor medio de adquisición de información espacio-temporal de la precipitación en el Sahel. Se han analizado tres series temporales de precipitación que cubren el periodo comprendido entre 1983 y 2012: GPCC, ARC2, TAMSAT. Estas series se han comparado con otras más recientes y que proporcionan estimaciones de mejor calidad: RFE2, TRMM 3B42 y GPCP-1dd. El resultado muestra una buena correspondencia entre las series GPCC, ARC2, RFE2 y TRMM 3B42. El análisis de 30 años de precipitación muestra que la precipitación anual se ha recuperado, aunque la tendencia en la distribución temporal anual ha cambiado: ahora llueve más pero durante menos tiempo.

Desde 1981 se dispone de datos del NDVI procedentes del sensor AVHRR y en su versión GIMMS3g. Sin embargo, hay aspectos en el diseño y procesado de los datos del sensor que introducen ruido en los datos. Existen conjuntos de datos del NDVI más recientes procedentes de los sensores VEGETATION y MODIS embarcados en los satélites SPOT y Terra, respectivamente, que se consideran una mejora sobre los datos AVHRR GIMMS3g, y estos productos ofrecen la posibilidad de evaluar la exactitud en el análisis de la tendencia de las series de tiempo del AVHRR GIMMS3g en el periodo de tiempo en el que los datos se solapan, de 2001 a 2012, a partir de lo cual se observa que el conjunto de datos AVHRR GIMMS3g es adecuado en estudios temporales de la vegetación en áreas que no reciben más de 1.000 mm

de precipitación, mientras que en la interpretación de las tendencias temporales en las zonas más húmedas debe de hacerse con ciertas reservas.

Resum

Al Sahel, la zona de transició entre el desert del Sàhara al nord i la sabana humida tropical al sud, el desenvolupament i la prosperitat de la població depenen en gran mesura del règim de pluges. El clima es caracteritza per una estació seca i llarga i una temporada curta de pluges entre els mesos de juny i setembre. La precipitació està determinada per un fort gradient de nord a sud amb pluges escasses i variables al nord, cosa que es tradueix en una gran diversitat d'espècies de vegetació i formes de vida: des d'arbustos espinosos de cobertura molt escassa intercalats entre pastures al nord a més quantitat de cobertura vegetal i espècies llenyoses al sud. El creixement de la vegetació mostra fluctuacions interanuals considerables, la qual cosa suscita una preocupació generalitzada en la població —predominantment rural—, ja que el seu modus vivendi es basa principalment en l'agricultura de secà i el pasturatge.

Les greus sequeres que van tenir lloc durant la dècada de 1970 i que es van allargar fins a mitja dècada de 1980, han estat àmpliament estudiades no només per les greus conseqüències sobre la població, sinó perquè es consideren un dels primers signes de canvi climàtic global. El Sahel és la regió on s'han evidenciat les grans variacions de precipitació i vegetació al llarg de les últimes tres o quatre dècades.

Els avenços tecnològics en el camp de la teledetecció han permès la vigilància dels ecosistemes gràcies a la disponibilitat de dades amb resolucions espacials, temporals i espectrals cada vegada més acurades.

En aquesta tesi s'investiguen els patrons temporals i espacials de la vegetació i la variabilitat de les precipitacions al Sahel a partir de les interrelacions basades en l'anàlisi de sèries temporals de l'índex de vegetació normalitzat (NDVI) en el període 1983-2012 i de les estimacions de precipitació procedents de satèl·lit. Mentre que la precipitació emergeix com una causa dominant de l'augment de la vegetació, hi ha evidències d'altres factors de caràcter antropogènic superposats a la tendència del clima.

Mesurar la precipitació en les regions semiàrides continua sent una feina crítica a causa de la seva gran variabilitat espacial i temporal; d'altra banda, cal afegir que al Sahel el nombre d'estacions meteorològiques disponibles és molt escàs. Les dades de satèl·lit, en combinació amb els mesuraments de les estacions meteorològiques, són actualment el millor mitjà per adquirir informació espaciotemporal de la precipitació a la regió. S'han analitzat tres sèries temporals de precipitació que cobreixen el període comprès entre 1983 i 2012: GPCC, ARC2, TAMSAT. Aquestes sèries s'han comparat amb altres de més recents i que proporcionen estimacions de més qualitat: RFE2, TRMM 3B42 i GPCP-1dd. El resultat mostra una bona correspondència entre les sèries GPCC, ARC2, RFE2 i TRMM 3B42. L'anàlisi de 30 anys de precipitació mostra que la precipitació anual s'ha recuperat, tot i que la tendència en la distribució temporal anual ha canviat: ara plou més però durant menys temps.

Des de 1981 es disposa de dades del NDVI procedents del sensor AVHRR en la seva versió GIMMS3g. No obstant això, hi ha aspectes en el disseny i processament de les dades del sensor que hi introdueixen soroll. Hi ha conjunts de dades del NDVI més recents procedents dels sensors VEGETATION i MODIS —embarcats en els satèl·lits SPOT i Terra, respectivament— que es consideren una versió millorada respecte de les dades AVHRR GIMMS3g. A més, aquests productes ofereixen la possibilitat d'avaluar l'exactitud en l'anàlisi de la tendència de les sèries temporals de l'AVHRR GIMMS3g en el període de temps en què les dades se solapen, de 2001 a 2012, i a partir d'això s'observa que el conjunt de dades AVHRR GIMMS3g és adequat en estudis temporals de la vegetació en àrees que no reben més de 1.000 mm de precipitació, mentre que la interpretació de les tendències temporals en les zones més humides s'ha de fer amb certes reserves.

Abstract

The development and population prosperity in the transition zone between the Sahara desert in the north and the tropical humid savannah in the south, known as Sahel, depends to a great extent on the rainfall regime. The climate is defined by a long and dry season and a short season with rains between the months of June and September. Rainfalls are determined by a strong north to south gradient with small and variable precipitation in the north, which translates into continuous change of vegetation species and life forms that range from sparse thorny shrubs in between grass in the north to a greater amount of vegetal cover and ligneous species in the south. The vegetation growth shows a considerable inter-annual fluctuation that generates a generalized concern in the predominantly rural population, since their way of life is mainly based on dry land agriculture and pasturing.

The severe droughts that happened during the 1970's, which were extended until the middle of the following decade, have been widely studied because of their serious consequences on the population, and because it is considered as one of the first signs of global climatic changes. Sahel is the region that has shown greater precipitation and vegetation variations in the last three to four decades.

Technological advances in remote sensing have allowed constant monitoring of ecosystems, mainly because of the availability of improved spatial, time and spectral data.

The present thesis investigates the time and spatial vegetation patterns and the precipitation variability in Sahel through interrelations based on the analysis of temporary series from the normalized vegetation difference index (NDVI) for the period 1983-2012 and rainfall satellite estimations. Whereas the precipitation emerges as a dominant cause from the increase of the vegetation, there is evidence of other anthropogenic factors overlapping the climatologic trend.

Measuring rainfall in the semi-arid regions continues to be a pivoting point because of great spatial and weather variability. On top of this, note that the number of available weather stations in Sahel is quite limited. Satellite data, along with meteorological stations measurements, are currently the best source of information with regards to spatial-temporary precipitation in Sahel. Three temporary series of precipitation have been analyzed to cover the period between 1983 and 2012: GPCC, ARC2 and TAMSAT. These series have been compared with more recent ones to provide better quality estimations: RFE2, TRMM 3B42 and GPCP-1dd. The result shows a good correlation between series GPCC, ARC2, RFE2 and TRMM 3B42. The analysis of 30 years of precipitation data shows a recovering of the annual precipitation, although the trends in the annual temporary distribution have changed: nowadays it rains more but during less time.

There are NDVI data available coming from the AVHRR sensor since 1981, as well as from its newer GIMMS3g version. Nevertheless, there are aspects in the design and processing of the sensor data that result in noise. There are data sets of the most recent NDVI coming from the sensors VEGETATION and MODIS installed in the SPOT and Terra satellites respectively, which are considered to be an improvement on the AVHRR GIMMS3g data. These sensors provide the possibility of evaluating the accuracy of the tendency analysis of the series of time of the AVHRR GIMMS3g in the period of time in which data overlap, from 2001 to 2012. This evaluation shows that the AVHRR GIMMS3g data set is correct in temporary studies of the vegetation in areas that do not record rainfalls greater than 1,000 mm, whereas the temporary tendencies in more humid zones should be interpreted with reservations.

Acrónimos y siglas

AMMA	African Monsoon Multidisciplinary Analyses
ARC	African Rainfall Climatology
ASCII	American Standard for Computer and Information Interchange
AVHRR	Advanced Very High Resolution Radiometer
CILSS	Comité Permanent Inter-Etats de Lutte contre la Sécheresse dans le Sahel
CRU	Climatic Research Unit
ENSO	El Niño-Southern Oscillation
EPSAT-SG	Estimation of Precipitation by SATellites – Second Generation
ESA	European Space Agency
EUMETSAT	European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
FEWS-NET	Famine Early Warning Systems Network
GCOS	Global Climate Observing System
GDPFS	Global Data-processing and Forecasting System
GHCN	Global Historical Climatology Network
GIMMS	Global Inventory Modeling and Mapping Studies
GLC	Global Land Cover
GOES	Geostationary Operational Environmental Satellite
GOS	Global Observing System
GOSIC	Global Observing Systems Information Center
GPCC	Global Precipitation Climatology Centre
GPCP	Global Precipitation Climatology Project
GPI	GOES Precipitation Index
GTS	Global Telecommunication System
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
ITCZ	InterTropical Convergence Zone
JAXA	Japan Aerospace Exploration Agency
JRC	Joint Research Centre
LEO	Low Earth Orbit
MODIS	Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer
MSG	Meteosat Second Generation
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
OMM	Organización Meteorológica Mundial
PROBA-V	Project for On-Board Autonomy - Végétation
RFE-2.0	Rain Fall Estimation version 2
SMM/I	Special Microwave
SPOT	Satellites Pour l'Observation de la Terre
SRI	Sahel Rainfall Index
SST	Sea surface Temperature
TAMSAT	Tropical Applications of Meteorology using SATellite and other data
TIROS	Television InfraRed Observing Satellite
TRMM	Tropical Rainfall Measuring Mission
USAID	U.S . Agency for International Development
VITO	Vision on technology
WMO	World Meteorological Organization
WWF	World Wide Fund for Nature
WWW	World Weather Watch

Índice

Resumen	1
Resum	3
Abstract	5
Acrónimos y siglas	7
 CAPÍTULO 1 Introducción	15
1.1 Contexto	15
1.2 Objetivos.....	21
1.3 Hipótesis de trabajo.....	22
1.4 Estructura del trabajo	22
 CAPÍTULO 2 Antecedentes. La precipitación y la vegetación medidas desde satélite: estado de la cuestión	23
2.1 Particularidades del Sahel.....	23
2.2 Clima, anomalías climáticas y cambio climático en el Sahel	26
2.2.1 La «paradoja del Sahel»	29
2.3 La lluvia en el Sahel	29
2.4 La precipitación medida desde satélite	30
2.5 Estado de la cuestión en la comparación de estimaciones de precipitación	32
2.6 Dinámica de la vegetación: estado de la cuestión	32
2.6.1 Sensores	33
2.6.2 Aumento de la vegetación o degradación del suelo	33
2.7 La relación entre vegetación y precipitación a partir de datos de satélite	35
 CAPÍTULO 3 Fuentes de datos.....	37
3.1 Introducción	37
3.2 Datos de precipitación	37
3.2.1 Datos de validación	38
3.2.2 Datos usados en la verificación de los datos de validación	40
3.2.3 Descripción de las estimaciones de precipitación por satélite	43
3.3 Datos de vegetación.....	50
3.3.1 AVHRR GIMMS3g.....	50
3.3.2 SPOT VEGETATION.....	51

3.3.3	MODIS	52
CAPÍTULO 4 Aspectos metodológicos.....		57
4.1	Introducción	57
4.2	Índice de vegetación de diferencia normalizada	57
4.3	Análisis de una serie climática	59
4.3.1	Comparación de variancias	59
4.3.2	Test de homogeneidad de una serie climática.....	59
4.4	Estadísticos básicos	61
4.4.1	Cálculo de anomalías estandarizadas	61
4.4.2	El sesgo (BIAS)	61
4.4.3	Error medio cuadrático (RMSE)	61
4.4.4	Coeficiente de variación	62
4.4.5	Modelización lineal entre variables	62
4.5	Evaluación de tendencias en las series temporales	64
4.5.1	Tendencias interanuales	64
4.5.2	Tendencias estacionales.....	66
CAPÍTULO 5 Análisis de los datos de precipitación		69
5.1	Introducción	69
5.2	Verificación de los datos de validación	71
5.2.1	Comparación de la precipitación recogida por las estaciones meteorológicas, GPCC y CRU.....	72
5.2.2	Comparación espacial entre el re-análisis GPCC y el índice SRI.....	83
5.2.3	Comparación de la distribución espacial de la interpolación GPCC y CRU	83
5.2.4	Resumen	86
5.3	Precipitación anual y otros parámetros estadísticos.....	87
5.3.1	Distribución espacial.....	87
5.3.2	Variabilidad pluviométrica	92
5.3.3	Sesgo o bias.....	93
5.3.4	RMSE	95
5.3.5	Regresión lineal.....	95
5.4	Análisis y comparación de la de precipitación entre 1983 y 2012	97
5.4.1	Tendencia de la precipitación entre 1983 y 2012	97
5.4.2	Sesgo.....	100

5.4.3	Comparación en puntos seleccionados	101
5.4.4	Regresión lineal.....	104
5.5	Conclusiones	105
CAPÍTULO 6 Análisis de los datos de vegetación		107
6.1	Introducción	107
6.2	Preprocesado	109
6.2.1	AVRHH GIMMS3g.....	110
6.2.2	Spot-Vegetation.....	111
6.2.3	MODIS MOD13A2	111
6.3	Comparación del NDVI entre AVHRR GIMMS3g, SPOT-VGT y MOD13A2	112
6.3.1	Análisis de tendencia temporal	112
6.3.2	Regresión lineal entre valores del NDVI	119
6.3.3	Influencia de las diferentes coberturas de vegetación en la tendencia	120
6.3.4	Comparación en puntos seleccionados	124
6.4	Análisis temporal del NDVI AVHRR GIMMS3g de 1982 a 2012	129
6.4.1	Distribución temporal y espacial.....	129
6.4.2	Análisis de la tendencia estacional	132
6.4.3	Análisis del ciclo fenológico de la vegetación	133
6.5	Conclusiones	135
CAPÍTULO 7 Comparación del régimen de lluvias y la evolución de la vegetación		137
7.1	Introducción	137
7.2	Preprocesado	140
7.3	Relación espacial y temporal entre el NDVI y la precipitación.....	140
7.4	Comparación de la correlación basada en periodos de tiempo diferentes.....	144
7.5	Tendencia y análisis espacial de los residuos	147
7.6	Análisis de resultados en localizaciones concretas	148
7.7	Conclusiones	150
CAPÍTULO 8 Conclusiones y futuras líneas de trabajo.....		153
8.1	Conclusiones generales	153
8.2	Futuras líneas de trabajo.....	156
BIBLIOGRAFÍA.....		159

CAPÍTULO 1 Introducción

1.1 Contexto

Desde finales de la década de 1960 el continente africano ha sufrido periodos recurrentes de sequía extrema, lo que ha generado graves crisis alimentarias que han provocado centenares de miles de muertos entre la población. Hoy en día, esta situación se recrudece y a los movimientos de refugiados climáticos hay que añadir los de refugiados a causa de la inestabilidad política en varias zonas del continente.

En el Sahel (Figura 1.1), la zona de transición entre el desierto del Sáhara y la región tropical lluviosa africana, el periodo anual de lluvias determina la viabilidad de las cosechas, el alimento de los rebaños y la posibilidad de frenar el avance del desierto, con lo cual la precipitación es fundamental para garantizar la supervivencia de la población que habita este territorio. La zona se caracteriza por grandes variaciones climáticas y precipitaciones irregulares que oscilan entre 100 y 200 mm en el norte, en la frontera con el desierto del Sáhara, y de 500 a 800 mm en el sur, con coeficientes de variación anuales que van del 15 al 30 por ciento (CILSS, 2012; Nicholson, 2013). En toda la región las precipitaciones se limitan, en general, a los meses de verano, con un pico de precipitación máxima que tiene lugar en el mes de agosto.

La agricultura es predominantemente de secano y depende de los tres o cuatro meses de lluvias en verano. Una de las características típicas del clima del Sahel es la sucesión de años secos y años húmedos (Figura 1.2). De hecho, los años extremos se suceden con frecuencia y es difícil determinar el significado de «precipitación normal». La región tiene una larga historia de estrés climático y acontecimientos extremos; esto incluye los periodos anormalmente húmedos de los años 1930, 1950 y 1960, así como los tres periodos de sequías importantes, el primero entre 1910 y 1916, después en los años 1941 y 1942, y finalmente el largo período que se inició en la década de 1970 y continuó de manera más persistente a lo largo de la década de 1980. Los valores de la precipitación anual de 1983 y 1984 fueron los más bajos jamás registrados en la historia de la región del Sahel, pero también hubo sequías severas en 1972, 1973 y 1977 (Hulme, 2001). Aunque las sequías en las regiones áridas y semiáridas están consideradas como parte de un patrón climático «normal» (Tschakert et al., 2010), la comunidad científica considera las hambrunas devastadoras asociadas a las grandes sequías

de las décadas de 1970 y 1980 como una evidencia indiscutible de cambio climático (Dai et al., 2004).

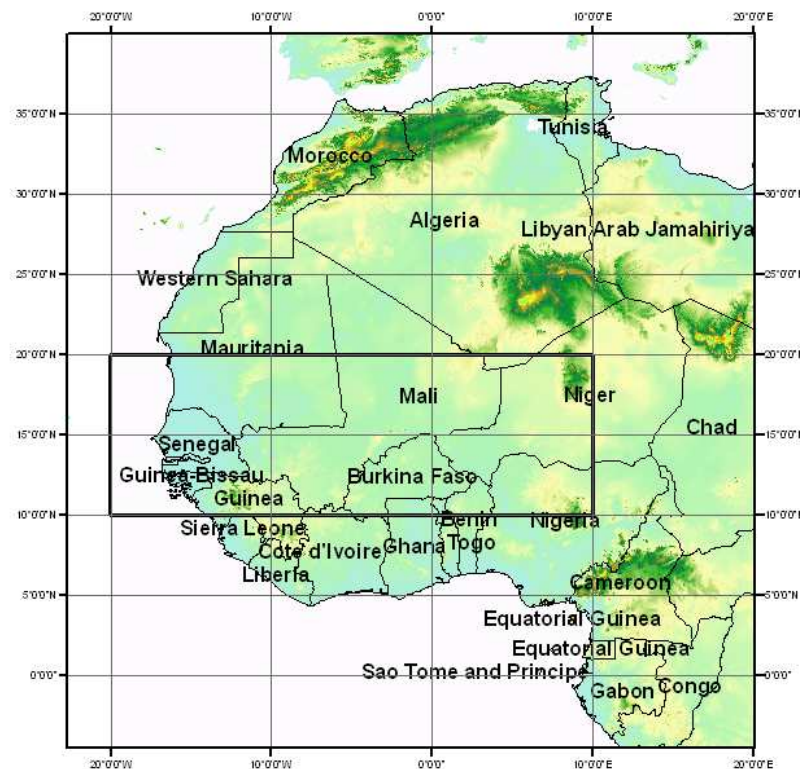


Figura 1.1. Área de estudio (enmarcada en negro) en el ámbito del Sahel.

Estudios sobre el clima en el pasado y registros arqueológicos indican que las condiciones climáticas y ambientales eran muy variables en escalas temporales que van de siglos a milenios (Brooks, 2006b). Por ejemplo, Nicholson et al. (2012a, 2012b) sitúan las sequías ocurridas en el siglo pasado en el contexto de importantes fluctuaciones de la precipitación en los dos últimos siglos e incluso sugieren que en la mayor parte de la primera mitad del siglo XIX se dieron condiciones más extremas de sequía que las habidas en el siglo XX. Sin embargo, existen pocos datos paleoclimáticos que permitan reconstruir la variabilidad climática más allá del siglo XIX. No hay registros instrumentales anteriores a finales del siglo XIX, por lo que las interpretaciones sobre la variabilidad se limitan a los registros escritos.

Existen evidencias arqueológicas que indican que el pastoreo en África se convirtió en una respuesta directa a la variabilidad y el cambio climático a largo plazo, y que se extendió por todo el norte de África como un medio de hacer frente a un clima cada vez más impredecible y árido. El pastoreo proporcionó seguridad alimentaria para las poblaciones africanas durante más de 7.000 años (Brooks, 2006a).

Históricamente, la población autóctona se dedicaba al pastoreo nómada como estrategia para sobrevivir en un ambiente hostil y climáticamente variable. Fue durante la época colonial y poscolonial, que coincidió con más de treinta años de periodos positivos y suficientes de lluvia, cuando se importaron modelos de desarrollo basados en climas predecibles. La población se hizo sedentaria e incorporó la agricultura y la ganadería como forma de vida; pero a partir de ese momento también se volvió vulnerable a la variabilidad climática (Martín Vide, 1993).

El abandono progresivo de la trashumancia por parte de los pastores se inició en la década de 1950, y esto se debió a distintos factores. Por un lado, la construcción de un importante número de pozos que permitían sacar agua de los acuíferos profundos terminó con la necesidad de

desplazarse en busca de agua para los rebaños. Por otro lado, las actividades agrícolas se extendieron por la zona sur, y esto limitaba la posibilidad de que los pastores migraran en esa dirección en la estación seca. Además, a partir de la década de 1960 los primeros gobiernos independientes de las colonias pidieron a la población que se establecieran dentro de las fronteras del país para poder incorporarlos, de este modo, en los nuevos sistemas administrativos. El proceso de sedentarización acarreó presiones de pastoreo que se concentraron en zonas concretas y provocaron la creación de zonas desnudas alrededor de los pozos (Hein y De Ridder, 2006).

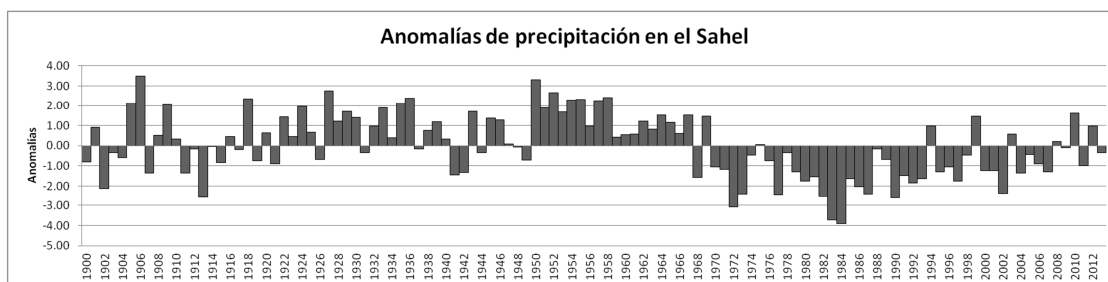


Figura 1.2. Variaciones interanuales (1900-2013) de las anomalías promedio de precipitación en los meses de junio, julio, agosto y septiembre (elaborado a partir de datos del índice climático Sahel Rainfall Index, 2011 (SRI, 2012)).

La presión humana sobre el medio ha acelerado el proceso de desertificación¹ en la zona. El suelo, como consecuencia de las sequías extremas, se ha degradado, y esto hace difícil su recuperación para el cultivo. La necesidad de combustible ocasiona una sobreexplotación de los recursos forestales y la única fuente de alimentación de la ganadería en la estación seca es el forraje que proviene de las hojas de los árboles. Con este escenario, desde finales de los años 70 del siglo pasado hasta la actualidad, existe el debate sobre si el desierto está avanzando hacia el sur o, por el contrario, las tierras se están recuperando y están produciendo más vegetación, especialmente a partir de mediados de la década de 1990 y hasta la actualidad.

La grave sequía que ha afectado al Sahel durante más de cuarenta años ha puesto claramente de manifiesto la fragilidad de los equilibrios humanos y ecológicos en esta parte de África (Figura 1.2). El déficit de precipitación acumulado en las últimas décadas es el desencadenante de la desertificación actual de la región y de las dificultades cada vez mayores para la supervivencia de sus habitantes. Las causas han sido ampliamente estudiadas tanto por las graves consecuencias sobre la población como por ser uno de los primeros signos de cambio climático global (por ejemplo: Anyamba y Tucker, 2005; Kaspersen et al., 2011; Hountondji et al., 2006; Dardel et al., 2014; Vrieling et al., 2013; Forkel et al., 2013; Huber et al., 2011; Cook y Pau, 2013).

La gran variabilidad espacial y temporal de la precipitación en una zona semiárida provoca amplias fluctuaciones en la producción agrícola. La variabilidad temporal afecta al inicio de la época de lluvias, la extensión del periodo de crecimiento de la vegetación y los intervalos entre los eventos lluviosos. Durante dicha época, las fluctuaciones en la intensidad hacen muy variable la cantidad de agua que puede ser retenida por el suelo y, por lo tanto, dificultan la posibilidad de ser utilizada por la vegetación. Por otro lado, la característica principal de la variabilidad espacial del clima en el Sahel es el fuerte gradiente sur-norte de la precipitación media anual.

¹ Desertificación es la degradación de las tierras de zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas a causa de varios factores, tales como las variaciones climáticas y las actividades humanas (Convención de la Lucha Contra la Desertificación, 1977, Naciones Unidas).

El quinto informe de evaluación (AR, por sus siglas en inglés) del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) pone de relieve la dificultad para sacar conclusiones sobre la tendencia de la precipitación anual durante el último siglo en el continente africano. Algunas áreas sobre las que hay suficientes datos incluyen como «muy probable» la disminución de la precipitación anual durante el siglo pasado en la parte occidental y oriental de la región del Sahel, en el norte de África, junto con un aumento también «muy probable» de la precipitación en el este y sur de África. Las precipitaciones en el Sahel, en general, se han reducido a lo largo del siglo XX, y han experimentado una recuperación hacia la última década del siglo pasado y la primera del siglo actual (IPCC, AR5, WG I, Chapter 14, 2013; Ackerley et al., 2011; Biasutti, 2013; Lebel y Ali, 2009; Nicholson, 2000). Tanto las sequías acaecidas en las décadas de 1970 y 1980, que están documentadas y han sido comprendidas (Biasutti y Giannini, 2006; Biasutti et al., 2008; Greene et al., 2009), como la recuperación de la precipitación observada en estas últimas décadas, 1990 y 2000, pueden deberse a la variabilidad natural (Mohino et al., 2011) o a un aumento de los gases de efecto invernadero² (Biasutti, 2013; Haarsma et al., 2005) o a una reducción de los aerosoles³ (Ackerley et al., 2011). Hay otros cambios previstos que han sido observados en simulaciones realizadas con modelos climáticos: por un lado, una disminución de la precipitación en el inicio de la temporada de lluvias, lo que es consecuencia de un pequeño retraso del inicio del monzón, y, por otro, un aumento de la precipitación hacia el final de la temporada. Estas proyecciones muestran variaciones entre modelos, tanto en la amplitud como en la dirección del cambio, que se atribuyen en parte a la incapacidad de los modelos generales de circulación atmosférica para resolver el comportamiento de la precipitación convectiva característica del monzón (Biasutti et al., 2008; Druyan, 2011; Fontaine et al., 2011; IPCC, 2014).

La agricultura es un sector importante en los países del Sahel dadas sus múltiples implicaciones en la seguridad alimentaria, el empleo y la contribución al producto interior bruto (PIB) nacional. La paradoja, sin embargo, es que la agricultura en estos países sigue siendo un sector muy poco desarrollado, caracterizado por: (1) dependencia casi total de las precipitaciones; (2) bajo uso de ayudas externas a la agricultura, como semillas mejoradas y fertilizantes; (3) ausencia de mecanización; y (4) poca conexión con los mercados (Kandji et al., 2006). El 98 % de la tierras cultivables son de secano, esto hace que la agricultura sea altamente vulnerable al cambio climático (FAO, 2002). Además, la agricultura es la principal actividad económica en términos de empleabilidad. El estancamiento de la producción agrícola en relación con el crecimiento de la población —en algunos países la población se ha duplicado entre 1980 y 2012 (FAO, 2011)— ha conllevado una disminución de la disponibilidad de alimentos per cápita desde la década de 1970 (IPCC, 2014; MDG Africa Steering Group, 2008).

La minería es otro sector económico en activo importante en algunos países de la zona, pero es altamente vulnerables a la política global y es probable que mantenga su fragilidad histórica en el futuro (UNECA y AUC, 2011).

La información sobre la variabilidad espaciotemporal de la precipitación, cada vez más impredecible, es fundamental para el control de la producción agrícola y ganadera y, en consecuencia, para la seguridad alimentaria. El problema radica en el número escaso de

² Gas de efecto invernadero: Componente gaseoso de la atmósfera, natural o antropogénico, que absorbe y emite radiación en determinadas longitudes de onda del espectro de radiación terrestre emitida por la superficie de la Tierra, por la propia atmósfera y por las nubes. Esta propiedad ocasiona el efecto invernadero. El vapor de agua (H₂O), el dióxido de carbono (CO₂), el óxido nitroso (N₂O), el metano (CH₄) y el ozono (O₃) son los gases de efecto invernadero primarios de la atmósfera terrestre (IPCC, 2013).

³ Aerosol: Suspensión de partículas sólidas o líquidas presentes en el aire, de tamaño comprendido entre unos pocos nanómetros y 10 micrómetros, que permanecen en la atmósfera durante varias horas o más. Los aerosoles pueden ser de origen natural o antropogénico. Pueden influir en el clima directamente, dispersando y absorbiendo radiación, e indirectamente, actuando como núcleos de condensación de nube o núcleos de hielo, o modificando las propiedades ópticas y el período de vida de las nubes (IPCC, 2013).

estaciones meteorológicas que proporcionan datos de lluvia en el Sahel, lo que se suma a una transmisión de datos deficiente, los cuales, además, pueden contener errores de muestreo (Lebel y Amani, 1999).

La teledetección y, en concreto, los programas de Observación de la Tierra (EO, por sus siglas en inglés) han contribuido a un mayor conocimiento del planeta donde vivimos, ya que nos permite monitorizar tanto en el tiempo como en el espacio fenómenos naturales y antropogénicos. Así, por ejemplo, los satélites meteorológicos nos permiten conocer algunas variables climáticas esenciales como: cobertura y tipos de nubes, humedad del suelo, contenido de vapor de agua en la atmósfera, precipitación acumulada, viento superficial, irradiación solar, temperatura del agua del mar, etcétera. Otros tipos de sensores, en especial aquellos que captan la energía en el espectro visible y el infrarrojo próximo, permiten obtener indicadores sobre la cobertura vegetal. Uno de los indicadores más utilizados es el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI, por sus siglas en inglés), que es una simple relación entre las bandas del espectro electromagnético que corresponden al rojo y al infrarrojo cercano (Tucker, 1979). Este índice espectral está fuertemente relacionado con la fracción de la radiación fotosintética activa interceptada por la vegetación y se utiliza habitualmente en la monitorización de los cambios de los ecosistemas (Anyamba et al., 2014; Eastman et al., 2013), en la detección de tendencias a largo plazo del crecimiento de la vegetación y en fenología (de Jong y de Bruin, 2012; Heumann et al., 2007).

Los sensores que proporcionan datos del NDVI a escala global son el Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR), desde 1981; el Système Pour l'Observation de la Terre-VEGETATION (SPOT-VGT), desde 1998, y el Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), desde el 2000, y se encuentran embarcados en los satélites NOAA 7, 9, 11, 14, 16, 17, 18 y 19, SPOT-4 y 5, y TERRA-AQUA, respectivamente. Estos instrumentos ofrecen datos con diferente resolución espacial y temporal debido principalmente al diseño de la órbita.

Las series temporales de imágenes del NDVI con alta resolución temporal (de cualquiera de los sensores citados anteriormente) constituyen una excelente herramienta para analizar los cambios de tendencia de la vegetación, la estacionalidad, la fenología del ecosistema y la estabilidad del mismo; en definitiva, permiten conocer la evolución de la vegetación de una zona extensa (por ejemplo: Anyamba et al., 2014; Anyamba y Tucker, 2005; Fensholt et al., 2009; Herrmann et al., 2005; Olsson, 2005).

Los registros de datos obtenidos por satélite a lo largo de más de 30 años ya permiten estudiar uno de los fenómenos más preocupantes en el Sahel como es la desertificación. Este fenómeno es, por naturaleza, un proceso lento en el tiempo, que requiere un registro de datos suficientemente largo para poder observar alguna evidencia de su tendencia. La serie temporal de AVHRR GIMMS3g proporciona una oportunidad única para analizar las hipótesis sobre la existencia, la dirección, la distribución espacial y algunas causas de la degradación del suelo utilizando el NDVI como un *proxy* de «productividad biológica».

Como se ha comentado anteriormente, se pueden realizar análisis de tendencias del NDVI basadas en tres décadas de mediciones continuas obtenidas con el sensor AVHRR GIMMS3g, pero es necesario estudiar la calidad y fiabilidad de estas series de tiempo comparándolas con otras series cronológicas que cubran un lapso de tiempo adecuado. Así, por ejemplo, se pueden comparar con los 14 años de datos del NDVI de SPOT-VGT (desde abril de 1998 hasta la actualidad) o los 12 años de Terra MODIS (de marzo de 2000 a la actualidad). Existe un gran número de trabajos sobre los métodos de análisis de las series temporales del NDVI, y algunos de ellos son comparaciones entre los diferentes sensores (Beck et al., 2011; Bégué et al., 2011; Brown et al., 2006; de Jong et al., 2011; Fensholt y Proud, 2012). Algunos estudios recientes intentan explicar los cambios observados en el NDVI por factores que no son exclusivamente la precipitación (Fensholt y Rasmussen, 2011; Fensholt et al., 2013; Helldén y

Tottrup, 2008; Herrmann et al., 2005; Huber et al., 2011; Mbow et al., 2014; Seaquist et al., 2009)

Por otro lado, los satélites meteorológicos proporcionan previsiones meteorológicas a corto y medio plazo. Estos satélites incorporan bandas espectrales en las regiones del infrarrojo (IR) y del microondas que permiten obtener estimaciones de precipitación. Cada uno de los productos que sirven esta tipología de datos, tanto a escala global como regional, ofrecen resoluciones espaciales y temporales diferentes, ya que han sido diseñados para cubrir aplicaciones científicas y operativas distintas. Entre los más usuales se encuentran los siguientes: TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission), TAMSAT (Tropical Applications of Meteorology using SATellite and other data) y RFE (Rain Fall Estimation).

El conocimiento fenológico de las cosechas, juntamente con las previsiones meteorológicas y la monitorización del estado de la vegetación a través de técnicas satelitales, permite prever estados de inseguridad alimentaria (Brown y de Beurs, 2008). Algunas organizaciones que trabajan en África occidental, como por ejemplo Famine Early Warning Network (FEWS NET), International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics (ICRISAT) o la unidad de seguridad alimentaria de AGRHYMET, son usuarias de estas técnicas (Figura 1.3).

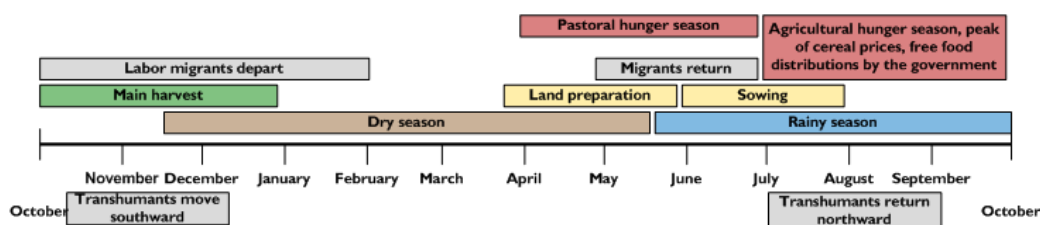


Figura 1.3. Calendario pluviométrico estacional y sucesos socioeconómicos en Malí. Fuente: FEWS NET.

La relación existente entre los índices de vegetación y las anomalías de lluvia ha sido estudiada en trabajos sobre desertificación y degradación del suelo alrededor del mundo (Helldén y Tottrup, 2008; Hill et al., 2008; Karnieli et al., 2008), y de forma concreta en la zona del Sahel, demostrándose que existe una correlación positiva entre las dos variables (Anyamba y Tucker, 2005; Brown et al., 2010; Capecchi et al., 2008; Chamaille-Jammes et al., 2006; Fensholt y Rasmussen, 2011; Funk y Brown, 2006; Martiny et al., 2006). A pesar de ello, a causa de las propiedades del suelo, el tipo de vegetación o la presión humana sobre el entorno, la relación entre el NDVI y la precipitación puede ser diferente en distintas partes de África, en cuanto a la linealidad y el desfase producido entre la precipitación y los valores máximos del NDVI (Martiny et al., 2006).

Es evidente que los datos procedentes de programas de Observación de la Tierra juegan un papel importante en el estudio de la dinámica de la vegetación y de las tendencias de precipitación, a escala global y en el Sahel en particular, debido a la escasez de mediciones fiables sobre el estado de la vegetación y la precipitación. Estos últimos datos se basan en una red de estaciones pluviométricas escasa y con graves problemas para facilitar datos correctos (Lebel y Amani, 1999). Por otra parte, las estimaciones de precipitación a partir de medidas de satélite no son del todo exactas, especialmente en zonas áridas y de costa (Wang et al., 2009).

En definitiva, tal y como se ha comentado anteriormente, desde una perspectiva de cambio climático, el Sahel —donde la dinámica de la vegetación está fuertemente relacionada con la precipitación, que es, además, una variable escasamente medida en la zona— es la región del mundo que ha sufrido las variaciones en el régimen pluviométrico más importantes en las últimas tres o cuatro décadas. Por tanto, a partir de estas premisas surgen las siguientes preguntas:

- ¿Existe una buena relación entre la precipitación medida por las estaciones meteorológicas y las estimaciones de precipitación obtenidas por satélite? ¿Se pueden utilizar las estimaciones de precipitación obtenidas por satélite para analizar la dinámica de la precipitación en las tres últimas décadas?
- ¿Son coherentes los datos del NDVI AVHRR GIMMS3g en comparación con los obtenidos por los sensores SPOT-VGT y MODIS?
- ¿Se puede confiar en los datos AVHRR GIMMS3g para analizar lo que ha sucedido en el Sahel en los últimos 31 años?
- ¿Los datos del NDVI AVHRR GIMMS3g son una buena aproximación en la monitorización de las variaciones pluviométricas?

No existe un acuerdo sobre los límites geográficos exactos que enmarcan el Sahel. Las características que lo distinguen, el clima y la vegetación, forman un proceso continuo de cambio rápido de norte a sur. Además, estas dos características ambientales se modifican en el tiempo, en cuestión de décadas. Algunos autores definen el Sahel como una estrecha franja de 5000 km que va desde el océano Atlántico hasta el mar Rojo (climáticamente muy diferente) donde sus límites norte sur están definidos por unos umbrales de precipitación.

En este trabajo los límites de la zona de estudio coinciden con los del índice climático Sahel Rainfall Index, 10° N a 20° N y de 20° O a 10° E, por su propia importancia y por el interés que este índice climático nos despertó en los primeros pasos de esta tesis.

1.2 Objetivos

La variabilidad climática en el Sahel ha generado un gran impacto en la vegetación especialmente en la década de 1980 y sus efectos se han notado en las décadas posteriores.

El **objetivo general** de este trabajo es analizar el impacto de la variabilidad climática en el Sahel y la dinámica de la vegetación en las tres últimas décadas, desde 1983 a 2012.

Para cumplir con el objetivo anterior se plantean los siguientes objetivos **específicos**:

- Comparar datos de estimación de precipitación, tanto de ámbito global como local, obtenidos mediante técnicas satelitales, con datos pertenecientes a la red pluviométrica en el Sahel.
- Estudiar la calidad y fiabilidad de las series temporales de datos del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) proporcionados por el sensor Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) comparándolos con series temporales de los instrumentos Système Pour l'Observation de la Terre-VEGETATION (SPOT-VGT) y Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS).
- Caracterizar la dinámica de la vegetación en la región mediante el análisis de series temporales a través de la respuesta espectral del NDVI.
- Analizar la correlación entre series de datos temporales del NDVI y de precipitación. Estudiar el desfase en tiempo entre el pico máximo del NDVI y el inicio de la época de lluvia.

Estos objetivos se verán con más detalle en los capítulos 5 («Análisis de los datos de precipitación»), 6 («Análisis de los datos de vegetación») y 7 («Comparación del régimen de lluvias y la dinámica de vegetación»).

1.3 Hipótesis de trabajo

Las hipótesis de trabajo que han guiado esta investigación se han formulado en los siguientes términos:

Hipótesis 1: Las estimaciones de precipitación obtenidas por satélite son adecuadas en aquellas zonas donde la densidad de estaciones meteorológicas es insuficiente

Hipótesis 2: El NDVI es un índice que permite evaluar espacial y temporalmente la distribución y la variación de la vegetación en el Sahel.

Hipótesis 3: Existe una buena correlación entre la precipitación estival y el NDVI en el Sahel.

1.4 Estructura del trabajo

Este trabajo está estructurado en ocho capítulos. En el capítulo 2 se desglosan las características geográficas y climáticas del Sahel y se realiza una revisión bibliográfica de los temas apuntados en esta introducción. En el capítulo 3 se detalla la naturaleza de las fuentes de datos a las que se ha recurrido y el proceso de preparación de los mismos previo al análisis. Los fundamentos teóricos se encuentran en el capítulo 4, en el cual se describe qué es y cómo se calcula el NDVI, cómo se analiza una serie climática de datos y la evaluación de tendencias en las series temporales.

El cuerpo principal de la tesis lo componen los capítulos 5, 6 y 7. En ellos se exponen y discuten los trabajos realizados con el fin de alcanzar los objetivos planteados.

En el capítulo 5 se analizan las diferentes fuentes de datos de precipitación existentes sobre el Sahel; datos de estaciones meteorológicas, mapas interpolados a partir de valores de las estaciones meteorológicas y estimaciones de precipitación elaboradas a partir de datos de satélite. Es importante conocer los puntos fuertes y débiles de cada uno de los conjuntos de precipitación.

La evaluación de los tres conjuntos de datos del NDVI se presenta en el capítulo 6. En dicho capítulo se valora la calidad de los datos de vegetación NDVI GIMMS3g respecto a los otros conjuntos SPOT-VGT y MODIS. Con los datos de AVHRR GIMMS3g se analiza la dinámica de la vegetación para los 31 años de los cuales se dispone de datos.

La comparación entre la dinámica de precipitación y la vegetación se efectúa en el capítulo 7. En este capítulo se estudia el comportamiento de la vegetación respecto a tres fuentes de datos de precipitación en el periodo de tiempo comprendido entre 1983 y 2012.

Para finalizar, en el capítulo 8 se presentan las conclusiones del estudio y las líneas futuras de trabajo.

CAPÍTULO 2 Antecedentes. La precipitación y la vegetación medidas desde satélite: estado de la cuestión

2.1 Particularidades del Sahel

El Sahel es la zona de transición entre el desierto del Sáhara y la sabana húmeda tropical en el sur; tiene una extensión aproximada de 5 millones de km², y comprende amplios espacios del Senegal, Gambia, Guinea Bissau, Burkina Faso, Níger, el Chad, Sudán, Guinea, Nigeria, Camerún, Mauritania y Malí (Figura 2.1). Sin embargo, es difícil establecer los límites latitudinales exactos ya que estos están sujetos a fluctuaciones, pues dependen principalmente de los patrones de lluvia de las últimas tres décadas. La vegetación predominante en el Sahel se compone de arbustos, hierbas y árboles dispersos que aumentan en densidad a medida que nos desplazamos hacia el sur (CILSS, 2012).

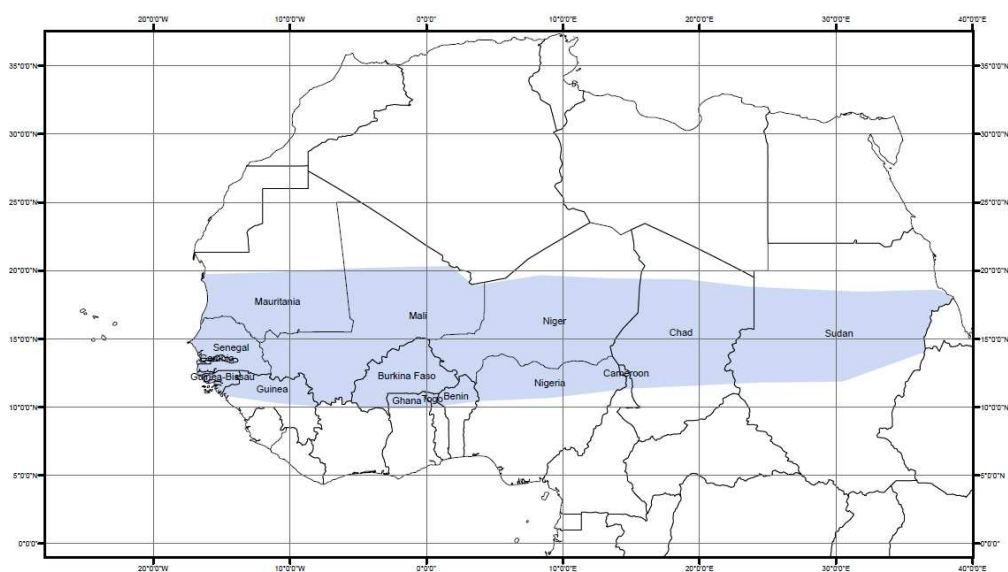


Figura 2.1. Extensión del Sahel.

Hoy, más que una simple zona eco-climática, el término Sahel también sirve para denominar una entidad geopolítica. En 1973, trece países del África occidental (Figura 2.2) formaron el Comité Permanente Interestatal de Lucha contra la Sequía en el Sahel (CILSS, por sus siglas en francés). El conjunto de estos países tiene una extensión aproximada de 3,7 millones de km² y acoge 58 millones de personas, que, además de compartir condiciones climáticas similares, comparten aspectos culturales y modos de vida. El sustento de la población se basa en la agricultura, la ganadería, la pesca, el comercio de corta y larga distancia y una gran variedad de empleos urbanos. Los cultivos de secano, como por ejemplo el mijo, el sorgo y la judía, constituyen la base alimenticia de la población, mientras que el cacahuate y el algodón son, principalmente, cultivos comerciales.

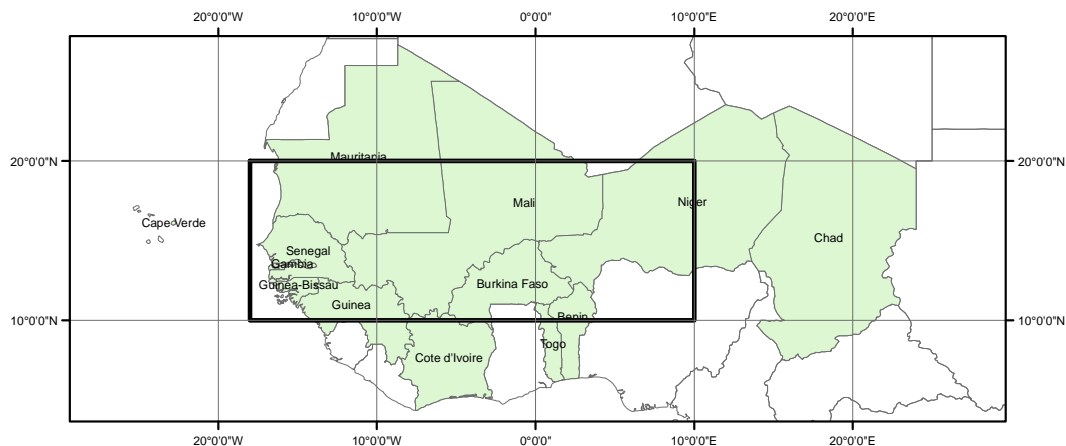


Figura 2.2. Países del Sahel que pertenecen al Comité Permanente Interestatal de Lucha contra la Sequía en el Sahel (CILSS). En el recuadro interior se ha enmarcado la zona que será objeto de estudio.

La agricultura en el Sahel depende casi exclusivamente de tres o cuatro meses de precipitación durante el verano, normalmente entre junio y agosto, exceptuando las riberas de los ríos principales, de los lagos y de otros cursos de agua estacionales donde se cultivan algunas especies de regadío. El ganado es otra fuente de ingresos, bastante importante en algunas áreas.

Las zonas del norte del Sahel están dominadas principalmente por praderas abiertas y dispersas, matorrales y desiertos de arena, mientras que las tierras de cultivo, vegetación leñosa y matorral caducifolio son características de los paisajes del sur (Figura 2.3).

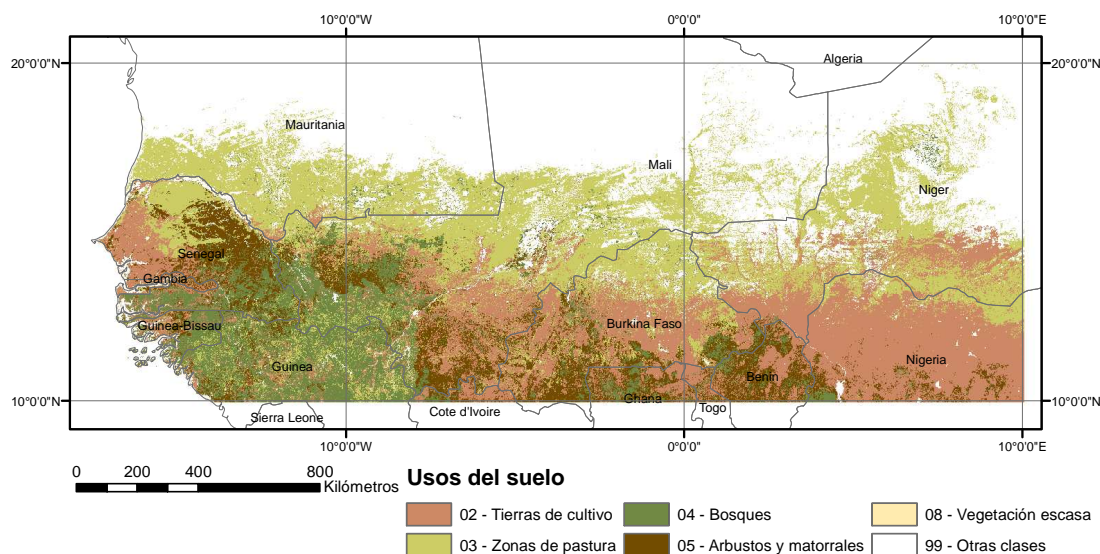


Figura 2.3. Mapa de usos del suelo GLC-share (Latham et al., 2014).

La World Wide Fund for Nature (WWF, por sus siglas en inglés) ha publicado el mapa de las grandes ecorregiones del Sahel (Olson et al., 2001). La WWF define una ecorregión como una unidad relativamente grande de tierra o agua donde confluyen una combinación de especies, comunidades naturales y condiciones ambientales. Los límites de una ecorregión no son fijos, sino que abarcan un área en la que tienen lugar importantes procesos ecológicos y evolutivos. Casi la mitad de las ecorregiones están consideradas en peligro o estado crítico; una cuarta parte es vulnerable, y la otra cuarta parte se encuentra en una situación relativamente estable.

El territorio que es objeto de estudio de esta tesis abarca 15 ecorregiones (Figura 2.4). Las más extensas, que se distribuyen en franjas este-oeste, son la sabana sudanesa (código científico AT0722), en el sur; la sabana saheliana de acacias (AT0713), en la zona intermedia, y el desierto del Sáhara (PA1327), en el norte. Pero también hay otras dos ecorregiones características, que son el delta interior del río Níger (AT0903), en Malí, y el mosaico guineano de sabana y bosque (AT0707).

Para más información sobre las características específicas de cada una de las ecorregiones se puede consultar el sitio web de la WWF (WWF Ecoregions, 2000).

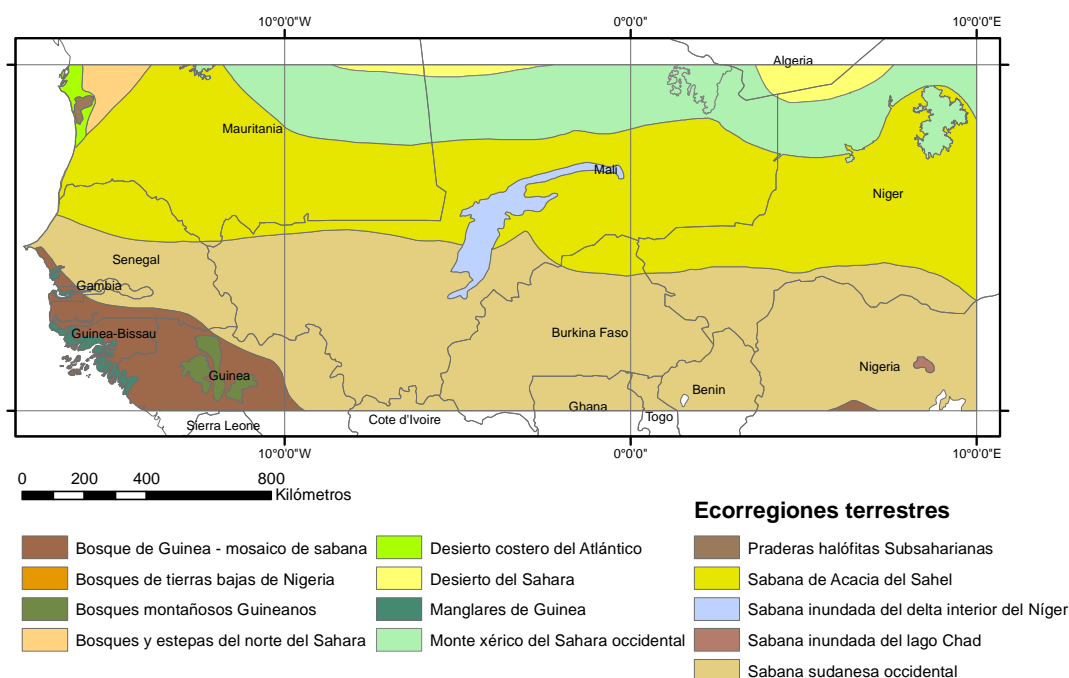


Figura 2.4. Ecorregiones terrestres en el Sahel según la WWF (Olson et al., 2001).

La seguridad alimentaria de la zona depende de su variabilidad climática. La sucesión de años extremadamente secos o húmedos es una característica típica del clima del Sahel. Las sequías extremas en distintos grados ocurren, aproximadamente, dos veces cada cinco años, lo cual genera incertidumbre tanto en las cosechas para subsistencia como en los cultivos comerciales.

Los suelos en el Sahel son esencialmente frágiles, bajos en carbono y pobres en fertilizantes (Hiernaux et al., 2009). Por tanto, cuando la gestión de la tierra no es la correcta, el resultado, en términos de bienestar humano y medioambiental, puede ser dramático. La clave pasaría por una agricultura sostenible en un suelo que sea y se mantenga fértil.

Desde la década de 1960, y muy especialmente en la década de 1980, ha aumentado la extensión cultivable y, por tanto, la producción alimentaria global, aunque ha disminuido la producción de alimentos per cápita debido a un rápido crecimiento demográfico (FAO, 2011).

En muchas áreas, la desaparición de barbechos y la contracción de pastos ha llevado al pastoreo excesivo, que tiene consecuencias igualmente devastadoras en los recursos naturales (Hiernaux et al., 2009).

La intensidad de la precipitación en la época húmeda y la fragilidad de los suelos en el Sahel favorecen su degradación. Las lluvias torrenciales del verano dificultan la absorción del agua en el suelo, especialmente si está desprotegido. La composición de dichos suelos (altos niveles de arena y bajos de arcilla) en contacto con las grandes gotas de agua, especialmente durante las primeras lluvias, produce una costra. Como consecuencia de este fenómeno, un 40 % de la precipitación total anual se pierde (Balme et al., 2006) y erosiona el suelo, degradándolo. Las pérdidas de suelo se cuantifican en unas 100 toneladas por hectárea cada año. En algunas áreas, debido a la ausencia de árboles, la erosión provocada por el viento, o deflación, puede ocasionar una pérdida de suelo adicional de más de 150 toneladas por hectárea cada año. La pérdida de la fracción de tierra vegetal (la que contiene la mayor parte de los nutrientes) por la erosión del agua y del viento es un agravante para la seguridad alimentaria y un elemento más que contribuye a la desertificación de la zona.

Una forma posible de evitar la erosión y la degradación de la tierra sería no prepararla para la cosecha hasta después de los primeros días de lluvia. Pero para los agricultores del Sahel esa no es su principal preocupación, sino las sequías y las plagas. Su forma habitual de trabajar la tierra es labrarla y sembrarla antes del inicio de las primeras lluvias, para que la tierra recoja la máxima cantidad de agua de lluvia posible.

2.2 Clima, anomalías climáticas y cambio climático en el Sahel

El clima en el Sahel se caracteriza por grandes variaciones: por un lado, una precipitación irregular e impredecible que oscila entre 200 y 600 milímetros concentrados en una intensa temporada de lluvias, que tiene su punto álgido en agosto y no dura más de 4 meses; por el otro, una estación seca prolongada (Nicholson, 1980). Además existe un acusado gradiente climático norte-sur, que va desde el desierto del Sáhara —casi sin vida— en el norte hasta las sabanas en el sur, y que provoca que los suelos, la vegetación, la fauna y el uso de la tierra sean muy distintos. Esto contrasta con la gran similitud climática y de cubierta vegetal en el eje este-oeste.

El clima en el Sahel depende de la oscilación norte-sur de la zona de convergencia intertropical (ITCZ, por sus siglas en inglés). En verano, cuando la ITCZ se desplaza hacia el norte, la zona queda afectada por el monzón del suroeste, que aporta —durante un breve periodo de tiempo— lluvias, a veces intensas, a la región. Después, cuando la ITCZ se desplaza hacia el sur se dan largos meses de sequía, durante los cuales el viento preponderante proviene del desierto (Janowiak, 1988).

Las lluvias en el Sahel se caracterizan por la variabilidad espacial y temporal, aunque las variaciones más importantes sean las inter e intra anuales. Sin embargo, no sólo se producen fluctuaciones anuales de precipitación, también tienen lugar épocas continuadas de sequía y épocas húmedas no tan continuadas, que determinan, en gran medida, el tipo y el patrón de la vegetación, la fauna y la gestión de los recursos naturales. Por otro lado, la temporada de lluvias difiere tanto por lo que respecta al momento de inicio como en la duración (de dos a cuatro meses), pero los «días de lluvia» dentro de la estación húmeda pueden estar separados por semanas y ser de precipitación intensa y torrencial. Los acontecimientos extremos son cada vez más recurrentes (Tschakert et al., 2010); por ejemplo, a finales del mes de agosto de 2013 murieron medio centenar de personas en la ciudad de Bamako por un episodio extremo de lluvia (Reuters, 2013).

En el siglo XX, tuvieron lugar en el Sahel tres periodos importantes de sequía: 1910-1916, 1941-1945, y un largo periodo de continuas anomalías negativas desde los años 70 hasta la actualidad, que ocupan la mayor parte de los años 80 y, con algunas interrupciones, los años 90. Estas anomalías negativas de precipitación en el Sahel contrastan con anomalías positivas en la mayor parte del hemisferio sur durante el mismo periodo de tiempo (Nicholson, 2000). Los valores anuales de precipitación en los años 1983 y 1984 están entre los más bajos registrados en la historia del Sahel, pero también se dieron sequías extremas en 1972, 1973 y 1977. En 1984, la sequía afectó de forma muy adversa a todos los países del Sahel, desde Mauritania a Etiopía. En cambio, la sequía registrada en 1973 fue más localizada, y afectó sobre todo a Malí, Níger y el Chad.

Durante los últimos 30 años, se han hecho esfuerzos para entender las causas de la sequía en dos direcciones opuestas. Por un lado, unos apuntan hacia causas antropogénicas, principalmente la degradación del suelo como consecuencia de una mayor presión de la población sobre el territorio, junto a una incorrecta gestión de los recursos naturales; esto significa que las causas son internas de la región y, por lo tanto, implica la necesidad de introducir estrategias para eliminar esa tendencia. Por otro lado, hay estudios que atribuyen la causa a patrones anómalos en la temperatura del océano; las causas son externas a la región y naturales, lo que requiere de estrategias de desarrollo y adaptación para hacerla menos vulnerable a las sequías (Brooks, 2004).

Desde la mitad de la década de 1970, el impacto humano sobre los recursos naturales de la zona ha ido aumentando exponencialmente, en especial la reducción de la cubierta vegetal. Como consecuencia, se ha producido un aumento del albedo; es decir, de la reflectividad de la cubierta terrestre.

Una de las hipótesis más comentadas y citadas en la bibliografía sobre las posibles causas antropogénicas como origen de la disminución de la precipitación en el Sahel es la que formuló Charney (Charney, 1975; Charney et al., 1977). La investigación se centra en la irreversibilidad de los procesos debidos a los cambios en los usos del suelo y el aumento de la reflectividad. Sugiere que un albedo elevado en el desierto contribuye a una pérdida de calor radiante en relación con su entorno. En los subtrópicos este descenso de aire frío se superpone a la rama descendente de la célula de Hadley, pero es más intensa. Teniendo en cuenta la biosfera, este mecanismo de retroalimentación podría conducir a inestabilidades en las regiones fronterizas del desierto. La reducción de la vegetación y el consiguiente aumento del albedo en la región norte del Sahel podrían provocar que el movimiento descendente del aire causase una desecación adicional del suelo sin vegetación, y, por lo tanto, perpetuar las condiciones áridas. En esta misma línea se centran varios autores (por ejemplo, Clark et al., 2001; Pitman et al., 2009; Taylor y Lambin, 2002; Xue y Shukla, 1993).

Courel et al. (1984) han estudiado los cambios en el albedo y la humedad del suelo durante la sequía de 1974. Estas dos variables afectan al balance de radiación de la cubierta, la primera de forma directa y la segunda indirectamente a través de su influencia sobre el cambio de calor latente de la superficie. Como conclusión a su trabajo, han encontrado un aumento significativo del albedo en la época seca.

También Govaerts y Lattanzio (2008) han realizado un estudio muy similar sobre la relación entre el albedo y la precipitación. Para ello han utilizado como referencia 1984, el año más seco de la década de 1980; y el 2003, que tuvo condiciones de precipitación similares a las de los años precedentes a las sequías de dicha década. Los datos del albedo los han obtenido de imágenes de archivo del satélite *Meteosat*. Los resultados no son homogéneos para toda el área donde se produjo la catastrófica sequía; por lo tanto, no pueden concluir que una mala gestión de los recursos naturales sea la causa del problema.

Kucharski et al. (2013), en uno de los artículos más recientes en el que se analizan las causas internas de la disminución de precipitación, estudian las anomalías en la temperatura de los océanos a través de modelos generales de circulación atmosférica a los que se añade la dinámica de la vegetación. Esto les permite analizar la variabilidad por causas internas y externas de la precipitación. Ellos concluyen que la sequía originada por los patrones anómalos de temperatura reduce la vegetación y, por lo tanto, aumenta el albedo de la superficie, que a su vez reduce la radiación neta en la superficie. Estas conclusiones refuerzan la hipótesis de Charney.

Las causas externas que podrían provocar los periodos recurrentes de sequía en el Sahel se encuentran en el análisis de las anomalías de la temperatura en la superficie de los océanos. Numerosos estudios basados en modelos numéricos son capaces de reproducir la variabilidad climática en respuesta a la variabilidad de la temperatura de la superficie global del mar. Estas simulaciones proporcionan pruebas de la posibilidad de que los océanos sean los desencadenantes de la variabilidad climática en el Sahel en escalas de tiempo que van de un año a una década; es decir, que se trata de fuerzas externas al Sahel y que dan forma a su variabilidad año tras año y a más largo plazo.

Por ejemplo, en el trabajo publicado por Giannini et al. (2003) se ha simulado con éxito la variabilidad interanual e interdecenal de las precipitaciones del Sahel, con un modelo de circulación atmosférica general basado en las temperaturas de la superficie de los océanos observadas entre los años 1930 y 2000. En este trabajo, de acuerdo con estudios anteriores (Palmer, 1986; Rowell, 2001), se identificó una relación entre las anomalías de la temperatura global del océano alrededor de África y las tendencias interdecenales de la precipitación en el Sahel. En concreto, hallaron que la sequía está estadísticamente relacionada con la temperatura de la superficie del océano Índico, y proponen que el calentamiento del océano Índico durante la segunda mitad del siglo XX podría haber causado la tendencia a la sequía del Sahel. Demostraron que las interacciones entre la tierra y la atmósfera se han visto debilitadas a causa del aumento de la temperatura del océano y, por consiguiente, el monzón no migra como es normal hacia el norte en la época estival.

Sin embargo, otros autores, aplicando otros modelos climáticos globales, obtienen resultados distintos entre sí, aunque se constata que los procesos de sequía están originados por las anomalías de temperatura de los océanos, y estas anomalías por los gases de efecto invernadero. Por ejemplo, anomalías de temperatura en el Atlántico ecuatorial y sur (Vizy y Cook, 2001), calentamiento en el océano Índico (Lu y Delworth, 2005), *El Niño* en el este y centro del Pacífico (Janicot et al., 1996, 2001; Rowell, 2001), y el enfriamiento en la cuenca mediterránea (Rowell, 2003).

Pero, ¿estos modelos son fiables? Rowell (2013) intenta responder a esta pregunta correlacionando seis regiones de África con patrones anómalos de temperatura con seis cuencas oceánicas. En el análisis de las 36 teleconexiones resultantes ha evaluado la capacidad de 44 modelos de circulación general atmósfera-océano. Estos modelos se utilizaron en la elaboración del tercer y el cuarto informe de evaluación del IPCC. Si nos centramos en el área de estudio de esta tesis, casi todos los modelos analizados han podido replicar bastante bien la relación entre la precipitación en el Sahel y la temperatura de la cuenca mediterránea, y con alguna dificultad la relación con la temperatura de la cuenca del Índico.

Giannini et al. (2013) realizaron una revisión de dos modelos de proyecciones climáticas apuntando que las sequías en el Sahel fueron producidas por un enfriamiento anómalo del Atlántico norte. Concluyen que a corto plazo las lluvias en el Sahel se recuperarán siempre y cuando el calentamiento que se está registrando en el Atlántico norte continúe sin entrar en la dinámica de los océanos tropicales. También auguran un aumento de la precipitación más marcada por la intensidad que por la frecuencia.

2.2.1 La «paradoja del Sahel»

En las últimas décadas y relacionado con las grandes sequías de las décadas de 1970 y 1980 se ha estudiado el caudal de los ríos y la escorrentía superficial. Se ha evidenciado un aumento de la escorrentía a pesar de la disminución de la precipitación, fenómeno que ha sido bautizado como la «paradoja del Sahel».

Para Descroix et al. (2009) la escorrentía superficial en la ecorregión de la sabana saheliana (Figura 2.4) ha ido en aumento entre 1968 y 1997 a pesar de que la precipitación ha disminuido entre un 20 y un 25 %. Por el contrario, en la zona sur, que corresponde a la ecorregión sabana sudanesa occidental, se ha evidenciado una reducción del 15 % de la precipitación y una reducción de la escorrentía anual. Como resultado en el conjunto de la zona, los grandes ríos, principalmente el Níger y el Senegal, han sufrido una disminución significativa del caudal a pesar de su considerable extensión en zonas de la sabana saheliana, ya que los aportes del caudal se producen principalmente en la región climática sudanesa, en el sur de la región (Descroix et al., 2009).

Otros autores no ven tan evidente el aumento de la escorrentía en la sabana saheliana (Figura 2.4). Por ejemplo, Dardel et al. (2014a) han estudiado este fenómeno en la región de Gourma, en Malí, y han determinado que esta afirmación no es evidente y puede ser causada por una deficiencia en la observación de los datos.

En cambio, Amogu et al. (2010) atestiguan que los coeficientes de escorrentía siguen aumentando como resultado de la reducción en la capacidad de retención del agua del suelo. El aumento en la escorrentía ha sido analizado a través de datos de campo en lugares concretos pero, según ellos, puede extrapolarse a toda la sabana saheliana. Este fenómeno es consecuencia de la degradación del suelo (Amogu et al., 2010).

2.3 La lluvia en el Sahel

La mayoría de autores que se han consultado para documentar esta tesis consideran que la precipitación en el Sahel está asociada al desplazamiento de la ITCZ hacia el norte durante el verano boreal y hacia el sur en el verano austral. Esta visión está basada en el concepto de la célula de Hadley de la circulación general atmosférica. De forma muy resumida, esta consiste en una zona de bajas presiones sobre latitudes ecuatoriales donde los vientos alisios, vientos cálidos del NE en el hemisferio boreal y del SE en el austral, convergen, ascendiendo el aire a las capas superiores de la atmósfera y, desde allí, se desplaza hacia los polos y desciende en las latitudes tropicales-subtropicales, alimentando la subsidencia de los dos grandes cinturones de altas presiones alrededor de unos 30° de latitud; desde ellos se generan los alisios, en dirección hacia el ecuador, cerrándose la célula. La célula de Hadley en el Sahel tiene la particularidad de que está formada por la convergencia de los vientos de Harmattan procedentes del noreste, que se originan en el Sáhara, y los vientos monzónicos del sudoeste que proceden del Atlántico (Figura 2.5). Las precipitaciones se generan como resultado de la inestabilidad térmica local.

Ahora bien, Nicholson (2009a) ha revisado la estructura del monzón y de la ITCZ en África occidental y ha observado varios defectos en esta imagen clásica del monzón comentada en el párrafo anterior y que ha sido corroborada por otros autores (Mohr y Thorncroft, 2006; Zhang et al., 2006). Uno de los defectos hallados está basado en el concepto de circulación general atmosférica; el esquema es válido en los océanos (Zhang et al., 2006), donde los vientos alisios están bien desarrollados y tienen buen recorrido, pero no lo es sobre el continente, donde estos vientos suelen ser escasos. Por otro lado, ha comprobado que la ITCZ se sitúa a 1.000 km al norte de la zona de máxima precipitación y de la zona de máxima convergencia.

Además, las precipitaciones en el Sahel están asociadas con las ondas del este de África y con grandes sistemas convectivos de mesoescala, en lugar de tormentas locales. Nicholson (2009a) hace notar la confusión existente en torno al término ITCZ, puesto que algunos autores se refieren a dicho término como una zona de convergencia de viento y otros como una zona de máxima precipitación.

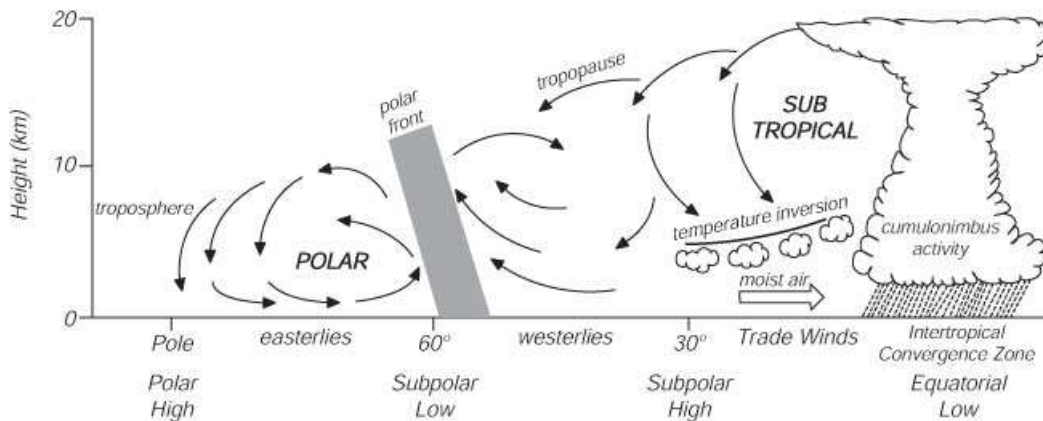


Figura 2.5. Esquema simplificado de circulación atmosférica global (Open University, 1989).

2.4 La precipitación medida desde satélite

Con el lanzamiento en 1960 del primer satélite meteorológico, *Television InfraRed Observation Satellite 1* (TIROS-1, por sus siglas en inglés), por parte de los Estados Unidos, se abrieron nuevos horizontes en la comprensión de la dinámica atmosférica y del clima y en la predicción meteorológica.

Aunque, inicialmente, los datos obtenidos por satélite se utilizaban exclusivamente para realizar predicciones meteorológicas a corto plazo, posteriormente, la alta repetibilidad de las imágenes junto con mediciones más precisas y detalladas permitieron extraer algunas de las variables climáticas esenciales: temperatura atmosférica, humedad, precipitación, viento, etc.

Actualmente, los satélites meteorológicos están en la vanguardia de la observación de la Tierra gracias a las mejoras tecnológicas introducidas en ellos y en sus sensores, que proporcionan una extensa gama de datos meteorológicos cuantitativos. La monitorización de la precipitación basada en medidas de satélite se ha convertido en una valiosa fuente de información en la investigación del clima global, pero sobre todo su importancia radica en la obtención de datos de precipitación en el mar y en regiones poco pobladas donde la existencia de medidas procedentes de estaciones meteorológicas es escasa o nula (Kidd, 2001; New et al., 2001).

La Organización Meteorológica Mundial (OMM) estableció el programa de vigilancia meteorológica mundial (World Weather Watch, WWW por sus siglas en inglés) en 1963 para coordinar las observaciones climáticas, tanto las procedentes de estaciones meteorológicas como las de satélite, incluyendo la red de satélites meteorológicos geoestacionarios y los de órbita polar baja (WMO, 2005). El WWW opera a nivel mundial, regional y nacional y su tarea principal es el diseño, implementación, operación y desarrollo de los siguientes tres sistemas:

- (a) El Sistema Mundial de Observación (Global Climate Observing System, GCOS por sus siglas en inglés) es el organismo encargado de la organización e implementación de las observaciones realizadas desde estaciones en superficie y en el espacio, así como de proporcionar datos de calidad y con una buena periodicidad a las organizaciones internacionales y a la comunidad de usuarios.

- (b) El Sistema Mundial de Telecomunicación (Global Telecommunication System, GTS por sus siglas en inglés) consiste en una red integrada de servicios y centros de telecomunicaciones que tiene como objetivo la distribución de forma rápida y eficaz de los datos de observación.
- (c) La Global Data-processing and Forecasting System (GDPFS, por sus siglas en inglés) consiste en centros meteorológicos de ámbito global, regional y nacional para proporcionar datos procesados y predicciones meteorológicas.

Los satélites meteorológicos se dividen en dos categorías en función de su órbita: satélites geoestacionarios y satélites de órbita baja (LEO, por sus siglas en inglés).

Los satélites en órbita geoestacionaria están situados a una altitud aproximada de 35.800 km sobre la vertical del ecuador y con la misma velocidad angular de rotación que la Tierra, lo que les hace parecer inmóviles en relación con su punto de referencia en la superficie del planeta. Esta característica permite monitorizar de forma constante el área que abarcan. Algunos de los satélites geoestacionarios que actualmente están en órbita sobre el ecuador son Meteosat, de la Agencia Espacial Europea (ESA), GOES (EE. UU.), Feng-Yun (China), INSAT (India), HIMAWARI (Japón), COMS (Corea del Sur).

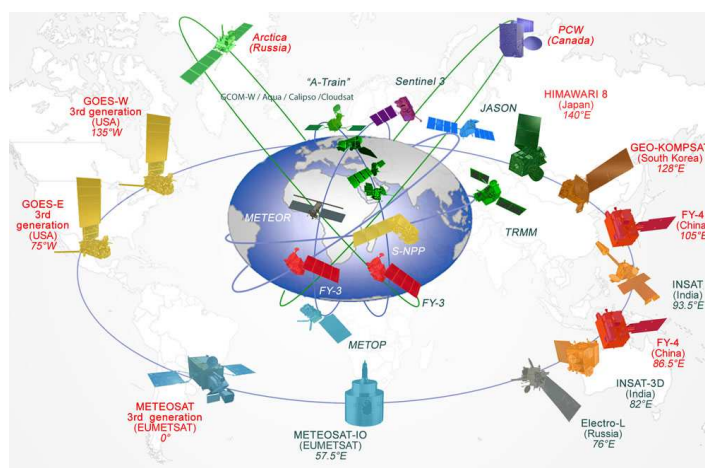


Figura 2.6. Sistema global de satélites meteorológicos. (Fuente: http://www.wmo.int/pages/prog/sat/globalplanning_en.php).

Aunque la tecnología de los sensores en órbita geoestacionaria varía, comparten una serie de capacidades comunes. Proporcionan datos en el espectro electromagnético del visible y del infrarrojo con una resolución espacial nominal de 1 km y 4 km, respectivamente; adquieren imágenes cada 30 minutos, aunque algunos satélites proporcionan imágenes cada 15, y los más recientes ofrecen capacidad de exploración del orden de minutos, pero para áreas más reducidas (Kidd y Huffman, 2011).

Los satélites en órbitas geoestacionarias proporcionan una plataforma inigualable para la observación continua de gran parte de la Tierra. Sin embargo, están limitados por la capacidad y resolución de las imágenes que pueden obtener, y por la cobertura deficiente de las regiones polares.

Las observaciones de los satélites LEO proporcionan imágenes que complementan las obtenidas por los satélites geoestacionarios. Los satélites LEO pueden subdividirse en misiones heliosíncronas, aquellos que cruzan el ecuador a la misma hora local en cada órbita, y no heliosíncronas. Los satélites LEO suelen incluir dos sensores, uno multispectral en la franja del espectro visible e infrarrojo, y otro en la banda de microondas pasivo, radiómetro; este último es capaz de realizar mediciones más directas de la precipitación. Estos satélites

dan una vuelta alrededor de la Tierra una vez cada 98 minutos a una altitud de unos 850 km, y llevan embarcados una amplia gama de instrumentos (Kidd y Huffman, 2011). Algunos de los satélites LEO actualmente en órbita son los NOAA y DMSP de la NOAA estadounidense, la serie MetOP de EUMETSAT y los FY de la agencia meteorológica china.

Los satélites meteorológicos que están hoy en día en órbita, los futuros lanzamientos y los instrumentos de cada uno se pueden consultar en la página web de la OMM (WMO Space Programme, 2014).

2.5 Estado de la cuestión en la comparación de estimaciones de precipitación

Existen pocas comparaciones de estimaciones de precipitación en el Sahel. La más reciente y que comprende algunas de las estimaciones de precipitación utilizadas en esta tesis corresponde a la realizada por Jobard et al. (2011). En ella se analizan 10 conjuntos de datos, estimaciones de precipitación, y se comparan con datos procedentes de estaciones meteorológicas. Las estimaciones de precipitación analizadas son: EPSAT-SG, RFE-2.0, TAMSAT, GPCP-1dd, GSMaP-MVK, TRMM-3B42, GPI, 3B42-RT, CMORPH, PERSIANN. El objetivo de esta comparación es la validación de la calidad del algoritmo de precipitación EPSAT-SG desarrollado en el marco del proyecto de análisis multidisciplinario del monzón africano (AMMA por sus siglas en inglés). El periodo de validación utilizado son los años que van de 2004 a 2006. Los mejores resultados de la validación en la comparación se han obtenido con aquellos productos de precipitación creados específicamente para la región, EPSAT-SG, RFE.2.0 y TAMSAT. El estudio confirma que las mejores estimaciones de precipitación se producen con aquellos algoritmos que se calibran con datos de estaciones meteorológicas.

2.6 Dinámica de la vegetación: estado de la cuestión

La dinámica de la vegetación, especialmente en la región del Sahel, ha dado lugar a debates controvertidos en la bibliografía científica de los últimos 30 años. La pregunta se centra en determinar si existe un aumento de la vegetación o bien el suelo se está degradando.

Varios trabajos han investigado la dinámica de la vegetación a escala global y han constatado una tendencia positiva de la misma en el hemisferio norte (por ejemplo, Alcaraz-Segura et al., 2010; Mueller et al., 2014; Zhou et al., 2001), que contrarresta una tendencia negativa en el hemisferio sur, principalmente en áreas con vegetación muy densa y clima húmedo (de Jong et al., 2011). Zhao y Running (2010) han evidenciado este mismo fenómeno, pero lo han estudiado a partir de la producción primaria neta de la vegetación, que cuantifica la cantidad de carbono atmosférico fijado por las plantas y acumulado como biomasa. Sus resultados sugieren una reducción global: las sequías a gran escala en el hemisferio sur han hecho disminuir el nivel de producción de biomasa, que no contrarresta el aumento en el hemisferio norte.

Sin embargo, estas tendencias observadas a nivel global no son significativas en grandes extensiones ni tampoco en el tiempo. Por ejemplo, Mueller et al. (2014) explican el 20 % de la variabilidad en la tendencia del NDVI sólo por la densidad de población; este hecho reafirma su hipótesis de que el aumento de vegetación en Europa es debido a causas principalmente antropogénicas por el abandono del medio rural.

2.6.1 Sensores

El sensor más utilizado en los estudios de seguimiento de la dinámica de la vegetación es el AVHRR, a bordo de los satélites NOAA. La principal ventaja de este instrumento es la larga serie temporal de datos que recoge, desde 1981 hasta la actualidad. Fue diseñado originalmente para el seguimiento de nubes, nieve y emisiones térmicas, y esto hace que sus amplios canales espectrales, canal 1 (580 a 680 nm) y canal 2 (730 y 980 nm), no sean ideales en la obtención de tendencias temporales de la vegetación; en especial el segundo canal, situado en la región del infrarrojo cercano (NIR), puesto que cubre una parte del espectro de la banda del rojo y una zona de absorción de vapor de agua atmosférico, y por lo tanto pueden resultar estimaciones inexactas de los índices de vegetación (Fensholt y Sandholt, 2005; Knauer et al., 2014).

Varios productos del NDVI se han desarrollado a partir de los datos brutos del sensor AVHRR, la última versión por parte del grupo GIMMS es la 3g. Esta versión tiene una resolución espacial de 8 km y temporal de 15 días y se han efectuado algunas correcciones atmosféricas (Pinzon y Tucker, 2014). Véanse las características técnicas de este producto en el capítulo 3 «Fuentes de datos».

Las otras dos fuentes del NDVI utilizadas en esta tesis proceden de los sensores VGT 1 y 2 embarcados en los satélites SPOT4 y SPOT5, respectivamente, y del sensor MODIS en el satélite TERRA. Estos sensores sí que fueron diseñados para el seguimiento de la dinámica de la vegetación, el problema es que sus series temporales todavía no son lo suficientemente largas como para evaluar las tendencias de la vegetación en términos climáticos. Véanse las características técnicas de este producto en el capítulo 3 «Fuentes de datos».

Fensholt et al. (2009) realizaron un estudio comparativo de estos tres productos del NDVI en el Sahel y encontraron que los valores AVHRR GIMMS3g eran adecuados para estudios de vegetación a largo plazo en las zonas con menos de 1.000 mm de precipitación anual; sin embargo, para la región de Guinea recomiendan que se utilice con precaución, ya que observaron discrepancias importantes en comparación con el conjunto de datos MODIS.

Fensholt y Sandholt (2005) compararon datos del NDVI de AVHRR y MODIS con datos in situ sobre Senegal. El valor más próximo a los valores in situ se produce con MODIS, un resultado que parece lógico ya que los valores MODIS fueron pensados para monitorizar la vegetación.

2.6.2 Aumento de la vegetación o degradación del suelo

Después de las fuertes sequías en las décadas de 1970 y 1980, el desierto del Sáhara se expandió hacia el sur. Tucker et al. (1991) fueron de los primeros investigadores en utilizar la teledetección para demostrar la recuperación de la vegetación incluso después de uno de los años más secos del siglo pasado, 1984. Su estudio señala la alta variabilidad interanual de la vegetación y su gran dependencia de la precipitación. Este estudio fue actualizado por Nicholson et al. (1998) con una serie temporal más larga de datos, de 1980 a 1995, en la que los datos de precipitación procedían de estaciones meteorológicas, pero se añadieron, como novedad, estimaciones de precipitación del satélite *Meteosat*. Sus resultados confirmaron los anteriores, no había habido un cambio ni en el límite del desierto ni en el límite de la cubierta vegetal.

En un estudio posterior, Eklundh y Olsson (2003) detectaron un fuerte aumento estacional del NDVI entre 1982 y 1999. Esta tendencia la interpretaron como la recuperación de la vegetación de las sequías de la década de 1980, aunque también detectaron un aumento de la precipitación durante ese mismo periodo. Anyamba y Tucker (2005) llegaron a las mismas

conclusiones pero basadas en el análisis de una serie de tiempo de 23 años de GIMMS NDVI (1981-2003). En cuanto al aumento de las precipitaciones, argumentaron que era parte de la historia climática de la región del Sahel, ya que las precipitaciones totales están todavía por debajo de las ocurridas en el periodo entre 1930 y 1965.

Heumann et al. (2007) analizaron la fenología de la vegetación entre 1982 y 2005, y detectaron un aumento de la amplitud estacional de la vegetación, que podía ser explicada por dos causas: por un lado, en la zona más septentrional, la vegetación se habría adaptado totalmente al medio y sería capaz de optimizar la poca agua que recibe; por otro lado, en la zona sur, se ha evidenciado un aumento en la duración de la estación de crecimiento.

Todos los estudios indican un aumento de la vegetación en los últimos 30 años, pero las causas de dicho aumento son objeto de controversia. Como se ha comentado anteriormente la precipitación también ha aumentado en estos últimos 30 años y la población prácticamente se ha duplicado; según Fensholt et al. (2013) esto podría estar enmascarando la degradación de la tierra causada por el impacto humano. Por lo tanto, es importante tener en cuenta el papel del clima y los posibles cambios climáticos con el fin de distinguir entre tendencias antropogénicas y/o climáticas de la dinámica de la vegetación.

La forma más común para detectar la degradación de la tierra es a partir del análisis de los residuos generados en el cálculo de la regresión entre la lluvia y el NDVI, donde el NDVI es la variable dependiente y la precipitación la variable independiente. Este método ha sido utilizado por Herrmann et al. (2005), que han observado que la precipitación es la principal razón del aumento de la vegetación en el Sahel, si bien el análisis de los residuos evidenció el impacto humano.

Olsson et al. (2005) investigaron la tendencia de la vegetación en el Sahel, sobre la base de datos de lluvia de 40 estaciones meteorológicas y los valores del NDVI procedentes de AVHRR GIMMS entre 1982 y 1999. Llegaron a la conclusión de que el aumento de la vegetación puede explicarse por otros factores diferentes a la precipitación, como por ejemplo la mejora de la gestión de la tierra, que tiene como resultado una mayor producción agrícola.

Boschetti et al. (2013) confirmaron el aumento de vegetación en el Sahel entre 1998 y 2010, con datos del NDVI SPOT-VGT y de precipitación RFE. Además, trataron de detectar puntos en los que se observasen anomalías tanto positivas, con un aumento anómalo de la vegetación, como negativas, donde se observase degradación de la tierra; estos puntos concretos los estudiaron a partir de imágenes Landsat TM y ETM+, correspondientes al inicio y final del periodo estudiado. Las principales razones de estas anomalías se identificaron con el abandono de tierras agrícolas y ganaderas a consecuencia del desplazamiento de la población, una intensificación del uso de las tierras de cultivo, o una expansión de la cobertura vegetal, principalmente por agricultura, en el delta interior del río Níger en Malí. La degradación de la tierra se sitúa en las áreas donde la presión demográfica es mayor y por lo tanto donde existe un aumento de la explotación de los recursos naturales.

Todos los estudios que se han comentado hasta el momento han sido realizados aplicando métodos lineales de análisis. Jamali et al. (2014) aplicaron un ajuste polinómico a los datos del NDVI GIMMS de 1982 a 2006. Su resultado confirma el predominio de tendencias lineales positivas del NDVI y causadas mayoritariamente por la precipitación, pero no descartan causas antropogénicas. Las tendencias no lineales fueron las menos frecuentes y dispersas.

También existen estudios de ámbito más local que complementan las investigaciones de grandes extensiones de terreno. Bégué et al. (2011) estudiaron la cuenca del río Bani en Malí a partir de 65 estaciones meteorológicas y datos del NDVI de AVHRR GIMMS en el periodo comprendido entre 1982 y 2006, y encontraron un aumento muy significativo de la vegetación y también de la precipitación. En su estudio ponen de manifiesto las dificultades para explicar el

aumento de la vegetación sólo con datos de precipitación y mapas de usos del suelo, y lo argumentan exponiendo que estas dificultades pueden ser debidas a la calidad de los datos. Encuentran que el incremento del área cultivada no explica el aumento de la vegetación, exceptuando la zona norte, y lanzan la hipótesis de que la dinámica de la vegetación natural con los patrones de la precipitación fueron los responsables de los resultados.

Brandt et al. (2014) han estudiado a escala local dos regiones en Senegal y Malí. El análisis se basó en imágenes de alta resolución, datos de campo y entrevistas con gente del lugar, y fueron varias sus razones para explicar el aumento de la vegetación: la expansión de los campos de cultivos y la silvicultura, junto con el incremento de la precipitación. Sin embargo, el análisis de imágenes del satélite Corona desde 1965 y las entrevistas con la gente del lugar revelaron que las condiciones ambientales actuales no son superiores a las condiciones previas a las grandes sequías de las décadas de 1970 y 1980.

Dardel et al. (2014b) analizan tendencias regionales a partir de datos de campo en dos regiones, Gourma en Malí y Fakara en Níger, comparándolas con los valores del NDVI AVHRR GIMMS3g. El análisis local en la región de Gourma reveló tendencias positivas significativas durante todo el período de estudio, tanto en los valores del NDVI AVHRR GIMMS3g como en las mediciones in situ. Dado que el análisis se inició en el año de sequía de 1984, este aumento de la vegetación fue interpretado como una señal de alta resiliencia del ecosistema. Los mismos análisis se replicaron para la región de Fakara, pero a partir de mediados de la década de 1990, y se observó una tendencia negativa de la vegetación; este hecho se explica por el mayor uso de la tierra —la expansión de la superficie cultivada y el aumento del pastoreo— y el incremento exponencial de la población.

2.7 La relación entre vegetación y precipitación a partir de datos de satélite

Los ecosistemas en el Sahel son dinámicos en respuesta a las fluctuaciones del clima, los cambios en los patrones de vegetación se explican por las variaciones pluviométricas, aunque pueden influir otros factores.

La relación entre la precipitación y la dinámica de la vegetación se puede estudiar directamente a través de una relación lineal de las dos variables, por ejemplo: Anyamba et al. (2014), Boschetti et al. (2013), Camberlin et al. (2007), Herrmann et al. (2005), Huber et al. (2011). Algunos de estos trabajos han sido comentados en el punto anterior, ya que uno de los objetivos era estudiar la tendencia de la vegetación en el tiempo respecto a la precipitación.

Anyamba et al. (2014), han comparado la nueva versión del NDVI AVHRR GIMMS3g con tres conjuntos de datos de precipitación que abarcan periodos de tiempo distintos. Uno de los conjuntos procede de estaciones meteorológicas y ha sido utilizado como conjunto de validación. Determinan que existe una buena relación entre las variables, de forma que les permite calcular la precipitación efectiva, aquella que es utilizada por las plantas para crecer, en comparación con el agua de lluvia que se evapora o se transforma en escorrentía superficial. Llegan a la conclusión de que los datos del NDVI AVHRR GIMMS3g se pueden utilizar como una aproximación para analizar e interpretar variabilidad del clima y la tendencia en zonas semiáridas.

En muchos trabajos se utiliza para comparar las dos variables el indicador «rain-use efficiency» (RUE, por sus siglas en inglés). RUE es el cociente de la producción primaria neta anual de materia vegetal, normalmente la suma del NDVI anual, y la precipitación total anual (Le Houérou, 1984). Este indicador fue desarrollado para normalizar el efecto de cambios en la precipitación, por lo que las tendencias positivas o negativas en el RUE apuntan a una mejora

o degradación en una área, respectivamente (Knauer et al., 2014). Aunque la fuerte dependencia entre la precipitación y la vegetación en el Sahel parece incuestionable, la proporcionalidad entre estas dos variables y, especialmente, entre el RUE y la precipitación ha sido muy cuestionada en estudios sobre la temática.

La discusión en torno al RUE se inició principalmente en los estudios de Hein (2006) y Hein y De Ridder (2006), quienes afirmaron haber detectado un error básico en el uso del RUE en la mayoría de los estudios que habían utilizado datos procedente de imágenes de teledetección. Sugirieron que la relación entre las variables no era lineal, sino esencialmente cuadrática cuando la precipitación total anual se sitúa entre los 200 y 300 mm. Con una baja precipitación anual, encontraron una desviación de la linealidad entre RUE y precipitación explicada por una pérdida de agua por evaporación. Para valores de alta precipitación, el RUE disminuye por factores distintos a la disponibilidad de agua (por ejemplo, nutrientes en el suelo) que limitan la productividad. Se observó que la conducta no lineal existe para niveles de precipitación anuales muy bajos o bien muy altos, pero que el comportamiento entre la vegetación y la precipitación es lineal en valores comprendido entre 200 mm y un límite superior que han llamado "efecto de saturación" de la vegetación. Algunos trabajos han estudiado cuál es el límite superior, por ejemplo, Li et al.(2004) encontraron que este estaba situado en los 700-800 mm/año, Martiny et al. (2006) en 800-1000 mm año, y Prince et al. (2007) sobre los 800 mm/año.

CAPÍTULO 3 Fuentes de datos

3.1 Introducción

La selección de los datos utilizados en esta tesis, tanto para los de precipitación como para los del NDVI, se ha basado en criterios de accesibilidad a dichos datos: por un lado, que estuvieran disponibles en línea para cualquier usuario, y por el otro, que fueran datos comúnmente utilizados por investigadores que trabajan en campos como la Climatología, la Hidrología, la Agricultura o afines a estos.

Los valores del NDVI que se han utilizado estaban muy claros desde el inicio de la tesis: los AVHRR GIMMS3g han cumplido más de tres décadas y permiten analizar las variaciones de la vegetación durante este periodo de tiempo. Los otros valores del NDVI elegidos han sido los procedentes del sensor VEGETATION en los satélites SPOT y del producto MOD13A2 procedente del satélite Terra; estos dos conjuntos han sido utilizados en una gran cantidad de estudios sobre vegetación en todo el mundo.

En los datos de precipitación seleccionados se ha buscado que su resolución espacial no fuese superior a 1° y la temporal fuese mensual o más detallada. Otro factor que se ha tenido en cuenta para las series temporales es que fuesen lo más largas posibles. Varios autores han evaluado previamente algunos de los productos de precipitación analizados en este trabajo (Jobard et al., 2011; Nicholson, 2013; Nicholson et al., 2003; Roca et al., 2010), que además fueron comparados respecto a datos de estaciones meteorológicas.

3.2 Datos de precipitación

Los datos de precipitación se han agrupado en tres conjuntos (Tabla 3.1): en primer lugar, los datos de validación, GPCC; a continuación, los que servirán para aceptar los datos de validación, estaciones meteorológicas, CRU y el Sahel Rainfall Index, y finalmente, los datos que proceden de medidas desde satélite ARC2, TAMSAT, RFE 2.0, TRMM-3B42 y GPCP-1dd.

Tabla 3.1. Tabla resumen de los datos de precipitación empleados en la tesis.

Nombre	Resolución espacial	Cobertura	Resolución temporal	Desde	Origen de los datos
GPCC	0,5°	global	mensual	1900	estaciones meteorológicas
CRU	0,5°	global	mensual	1901	estaciones meteorológicas
Sahel Rainfall Index	---	20° O - 10° E 20° N - 10° N	mensual	1900	estaciones meteorológicas
ARC2	0,1°	20° O - 55° E 40° N - 40° S	diaria	1983	satélite con calibración de est. meteorológicas
TAMSAT	0,0375°	19° O - 52° E 38° N - 36° S	10 días	1983	Satélite
RFE2.0	0,1°	20° O - 55° E 40° N - 40° S	10 días	2001	satélite con calibración de est. meteorológicas
TRMM-3B42	0,25°	180° O - 180° E 50° N - 50° S	diaria	1998	satélite con calibración de est. meteorológicas
GPCP-1dd	1°	global	diaria	1996	satélite con calibración de est. meteorológicas

3.2.1 Datos de validación

3.2.1.1 GPCC

El Global Precipitation Climatology Centre (GPCC, por sus siglas en inglés) contiene datos globales de precipitación mensual. Estos datos son un nuevo análisis, en formato ráster, de datos de precipitación de estaciones meteorológicas que pertenecen a la red de la OMM y a otras fuentes. El GPCC fue creado en 1989 por el servicio meteorológico alemán por invitación de la OMM. Su tarea principal consiste en el análisis de la precipitación mensual de la superficie terrestre basada en la información procedente de pluviómetros a escala global. Con los años, se ha creado una base de datos que contiene registros de precipitación de más de 85.000 estaciones de todo el mundo. El GPCC ha integrado en su base de datos otros conjuntos de datos que existían previamente como, por ejemplo, el de la Climatic Research Unit (CRU, por siglas en inglés), conjunto descrito en el epígrafe 3.2.2.2, y el del Global Historical Climatology Network (GHCN, por sus siglas en inglés), y también ha adquirido datos de precipitación adicionales a través de contactos bilaterales y con el apoyo de la OMM. Los datos de las diferentes fuentes se almacenan por separado en la base de datos del GPCC.

La base de datos del GPCC recoge datos de precipitación sobre una base mensual a partir de una variedad de fuentes, tal y como se ha comentado anteriormente. Los datos son distribuidos por los servicios meteorológicos nacionales a través del GTS de la OMM para satisfacer las necesidades de análisis meteorológicos en tiempo casi real. Además de los datos procedentes del GTS, la GPCC incluye datos de precipitación procedentes de los servicios meteorológicos

de unos 190 países, los cuales son una parte importante de esta base de datos, aunque no están disponibles en tiempo real sino con cierto retraso temporal.

Un punto crucial en la fusión de los conjuntos de datos de diferentes fuentes es el control de calidad y la armonización de los metadatos de las estaciones para evitar la duplicación de las mismas y para asignar los valores correctamente en la base de datos y garantizar la coherencia de las series temporales. Esto no siempre es trivial, ya que los metadatos de la estación pueden diferir de una fuente a otra. Con los años, el GPCC ha desarrollado un sofisticado sistema de control de calidad para asegurar la coherencia de los metadatos de la estación así como la calidad de los datos de precipitación.

El cálculo de los mapas ráster a partir de las observaciones de las estaciones meteorológicas consta, de forma resumida, de los siguientes pasos:

1. Interpolación de las anomalías de las normales climatológicas en las estaciones a puntos en las celdas que configuran el modelo ráster de 0,25° o 0,5° de latitud/longitud para los productos en tiempo casi real.
2. Promedio de las anomalías en las cuatro esquinas de la celda de 0,25° o 0,5°.
3. Cálculo de la anomalía media del área del ráster para una resolución espacial de 0,5°, 1° y 2,5° mediante la aplicación de una ponderación en función de la proporción de tierra de cada celda. Este paso se lleva a cabo principalmente en aquellas celdas situadas en la costa.
4. Superposición de las anomalías en formato ráster sobre la precipitación mensual.

La elaboración de los productos de análisis ráster procedente de las observaciones de las estaciones meteorológicas se han interpolado en la rejilla ráster aplicando el método SPHEREMAP (Willmott et al., 1985).

El error de muestreo de los datos ráster de precipitación mensual en varias regiones del mundo ha sido cuantificado por la OMM e investigado por el GPCC (Rudolf et al., 1994). El error de muestreo relativo de la precipitación mensual para una celda que contenga cinco pluviómetros se sitúa entre valores del ± 7 y el 40%, del valor real de la zona, y con diez estaciones el error se reduce y abarca un rango del ± 5 al 20%. El rango del error para un número determinado de estaciones refleja la variabilidad espacial de la precipitación en la región considerada y depende de la orografía, la temporada y el tipo de precipitación (convectiva, estratiforme). Junto con el mapa ráster de precipitación, el GPCC proporciona otros mapas que contienen en cada celda el número de estaciones meteorológicas como una estimación aproximada del error de muestreo.

Estos conjuntos de datos los mantiene el Servicio Meteorológico Nacional Alemán (Deutscher Wetterdienst, DWD, por sus siglas en alemán) y se pueden descargar desde la página ftp://ftp-anon.dwd.de/pub/data/gpcc/html/fulldata_download.html.

Este producto se basa en el análisis de todas las estaciones meteorológicas, tanto aquellas que suministran sus registros en tiempo real como aquellas que no. Estos datos se presentan con una resolución espacial de 0,5°, 1,0° y 2,5°. Las estaciones meteorológicas que se han utilizado tenían un mínimo del 90% de sus registros correctos durante el periodo analizado.

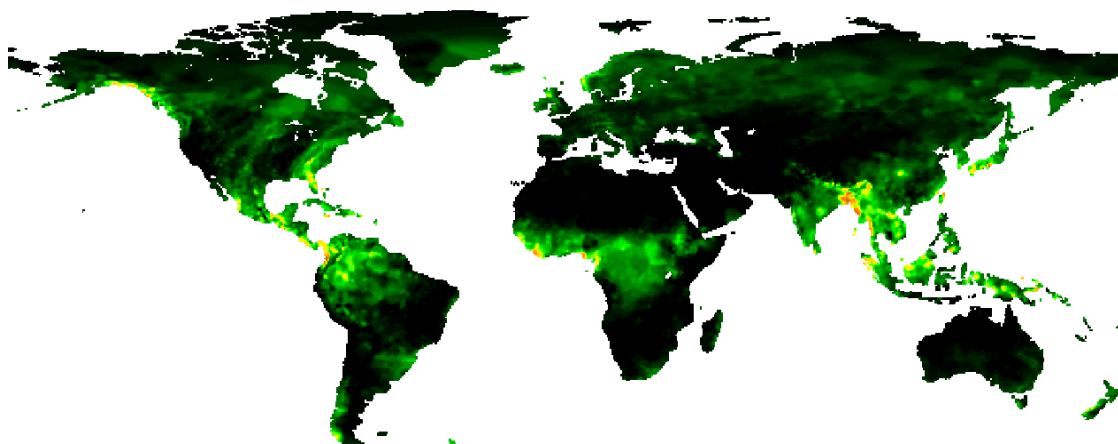


Figura 3.1. Precipitación acumulada en el mes de septiembre de 2004 con una resolución espacial de 0,5°.

Se puede encontrar una descripción detallada de la construcción de los datos en las referencias bibliográficas de Becker et al.(2012) y Schneider et al.(2013), y en la web <http://gpcc.dwd.de>.

Descripción de los datos GPCC descargados

Los datos se han descargado del servidor de datos del GPCC (<http://gpcc.dwd.de>) y corresponden al producto Full Data Reanalysis en formato ascii con resolución espacial de 0,5° y temporal mensual, de 1983 a 2011 (Figura 3.1). El año 2012 el producto disponible ha sido el First Guess Product con una resolución espacial de 1° y también mensual.

Se ha escrito una pequeña rutina en Fortran que ha permitido transformar los datos de ascii a ráster y recortarlos a la medida del área de estudio.

3.2.2 Datos usados en la verificación de los datos de validación

Los datos usados para verificar la bondad del conjunto de validación han sido los valores de la red de estaciones meteorológicas CRU y Sahel Rainfall Index.

3.2.2.1 Datos de la red de estaciones meteorológicas de la OMM

La Organización Meteorológica Mundial (OMM) posee una red de estaciones meteorológicas situadas en el Sahel (Figura 3.2). De algunas de estas estaciones se tienen registros que datan de inicios del siglo pasado, pero en las últimas décadas no se han cumplido los criterios de calidad y homogeneidad de los datos impuestos por la OMM (Poccard et al., 2000); en especial, desde la década de 1990 se ha producido una fuerte disminución del número de estaciones meteorológicas en el Sahel que han proporcionado información de forma continuada.

Las bases de datos que contienen los datos meteorológicos de las estaciones de la OMM se pueden descargar de diferentes organismos internacionales y son de fácil y libre acceso. Por ejemplo, pueden encontrarse en la página web del CILS Research Data Archive accediendo a la base de datos de la World Monthly Surface Station Climatology (<http://dss.ucar.edu/datasets/ds570.0/>) o bien de la Agencia Meteorológica Japonesa (<http://ds.data.jma.go.jp/gmd/tcc/climatview/>).

Uno de los inconvenientes más importantes, comentado anteriormente, en la utilización de estos datos es la ausencia de registros puntuales en diversas estaciones en los últimos años,

que convierte en inservible a los fines de esta tesis alguna de las estaciones. Otro inconveniente es la inexistencia de datos de las estaciones situadas en Guinea para el periodo estudiado. Estos problemas pueden estar motivados por el deterioro de las redes meteorológicas y por la falta de financiación para su mantenimiento (Poccard et al., 2000).

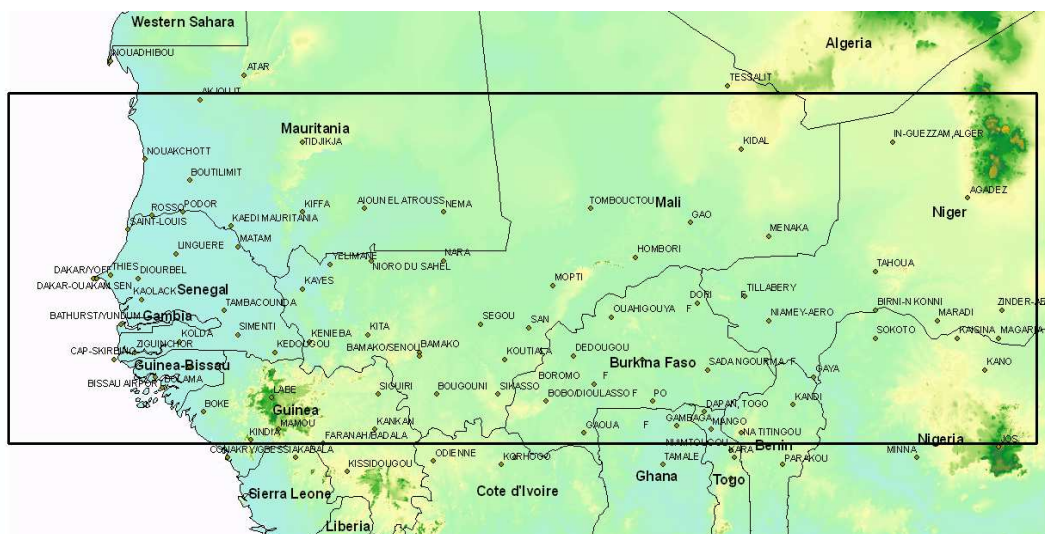


Figura 3.2. Estaciones meteorológicas de la OMM en la zona de estudio.

En diciembre del 2009, la NOAA y el National Climatic Data Center de EE. UU., con el objetivo de tratar de ayudar a que la comunidad científica tuviera acceso a los datos climáticos de forma fácil y libre, impulsó el Global Observing Systems Information Center (GOSIC) (<http://gosic.org/>). Este portal centraliza la información y los datos del Sistema Mundial de Observación del Clima (GCOS, por sus siglas en inglés), el Sistema Mundial de Observación de los Océanos (GOOS) y el Sistema Mundial de Observación Terrestre (GTOS) y sus programas asociados, como la Vigilancia de la Atmósfera Global (GAW), y sistemas regionales de observación.

Descripción de los datos de la red de estaciones meteorológicas descargados

Los datos son de carácter puntual con periodicidad mensual y se encuentran disponibles en la página web <http://rda.ucar.edu/datasets/ds570.0/>, desde donde puede descargarse un único archivo con todas las estaciones existentes o bien uno para cada una de las estaciones.

3.2.2.2 CRU

La base de datos de la Climatic Research Unit de la Universidad de East Anglia, en Norwich (Reino Unido), proporciona un conjunto de datos climáticos en formato ráster con resolución espacial de 0,5° y cobertura global, exceptuando la Antártida, con información obtenida por estaciones meteorológicas para el periodo de tiempo comprendido entre 1901 y 2012. La base de datos CRU fue desarrollada inicialmente por New et al. (1999, 2000) y actualizada por Mitchell y Jones (2005).

Los datos CRU se construyen utilizando el método de la anomalía climática (Peterson et al., 1998). Las series temporales procedentes de las estaciones meteorológicas que participan en la elaboración del conjunto de datos CRU tienen una cantidad de datos suficientes para el periodo de tiempo de nuestro estudio. El periodo base sobre el cual se calculan las anomalías va de 1961 a 1990 con un mínimo de 23 valores para cada mes. Los valores de la anomalía de cada mes son utilizados para la construcción del mapa ráster, siempre y cuando el dato no sea un valor atípico, es decir, no sea superior a cuatro veces el valor de la desviación estándar.

A partir de la información que proporciona una estación meteorológica, se han construido diferentes conjuntos de mapas ráster mensuales que proporcionan datos como: precipitación, temperatura, presión de vapor, días de lluvia, días con cobertura de nubes, rango de temperatura diurna, temperatura máxima, temperatura mínima, días con niebla y la evapotranspiración potencial. También se puede descargar un mapa ráster de cada mes con el número de estaciones meteorológicas por celda que han participado en el análisis.

Se puede ampliar la información del conjunto de datos CRU en la referencias bibliográficas de Harris et al. (2013); New et al. (1999, 2000), y desde la página web <http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/hrg/#info>.

Descripción de los datos CRU descargados

Los datos se han descargado desde la página web del British Atmospheric Data Centre (BADC); es necesario estar registrado para poder acceder a ellos, 360 archivos en total en formato NetCDF (http://badc.nerc.ac.uk/browse/badc/cru/data/cru_ts/cru_ts_3.21/data).

3.2.2.3 Sahel Rainfall Index

El Sahel Rainfall Index (SRI, por sus siglas en inglés) es, tal y como indica su nombre, un índice (un único valor numérico, no tiene componente espacial) que describe la anomalía de precipitación en el área comprendida entre los 10° y los 20° de latitud norte y los 20° oeste y los 10° este de longitud, en total cubre una superficie de 3,3 millones de km². Los datos cubren una serie temporal continuada desde el año 1900 hasta la actualidad (Figura 3.3), y se ofrecen a nivel anual o mensual. El periodo de referencia utilizado para su cálculo es de 1950 a 1979. Los datos se pueden descargar desde la página web del Joint Institute for the Study of the Atmosphere and Ocean (JISAO) (<http://jisao.washington.edu/data/sahel/>).

El índice fue propuesto por Janowiak, (1988) y se determina basándose en un análisis de componentes principales (ACP) de los datos promedio de junio a septiembre de las estaciones meteorológicas comprendidas en la zona.

Los datos históricos provienen del Global Historical Climatology Network de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) de los Estados Unidos; los datos a partir de 1950 proceden de 14 estaciones meteorológicas de referencia en el territorio y que tienen las series de datos prácticamente completos hasta la actualidad más las estaciones que pertenecen a la red de la OMM.

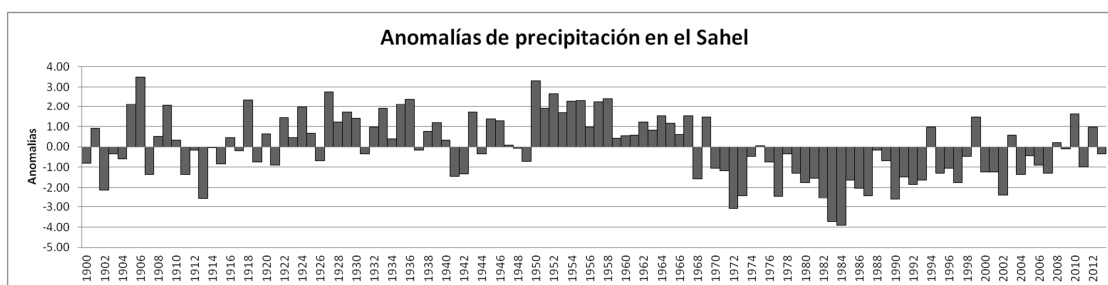


Figura 3.3. Anomalía de precipitación del Sahel Rainfall Index.

3.2.3 Descripción de las estimaciones de precipitación por satélite

3.2.3.1 ARC2

El African Rainfall Climatology versión 2 (ARC2, por sus siglas en inglés) es un algoritmo implementado por el Climate Prediction Center de la NOAA para Famine Early Warning Systems Network (FEWS-NET, por sus siglas en inglés), que está basado en el algoritmo de estimaciones de precipitación RFE 2.0 (véase el epígrafe 3.2.3.3) con el objetivo de obtener estimaciones de precipitación significativas que permitan la evaluación del estado actual y la evolución del clima en África.

Los datos ARC proporcionan imágenes diarias de estimaciones de precipitación a varias escalas de tiempo y en tiempo casi real. Este proceso es fundamental para la monitorización de la inseguridad alimentaria, la agricultura y los recursos hídricos en el continente africano.

Inicialmente se desarrolló el algoritmo ARC1 basado en el algoritmo RFE 2.0, que incorporaba solo dos de las cuatro fuentes que contiene RFE 2.0: datos de estaciones meteorológicas y datos en la banda del infrarrojo. El resultado fueron imágenes diarias de buena resolución espacial entre 1995 y la actualidad aunque con cierto sesgo (Love et al., 2004).

La necesidad de tener datos de precipitación a más largo plazo para el análisis climático motivó una nueva calibración de los datos en la banda del infrarrojo y de los datos diarios de las estaciones meteorológicas impulsando la implementación del algoritmo ARC2, que proporciona datos diarios desde 1983 hasta la actualidad con una buena resolución espacial.

Los mapas de precipitación diaria ARC2 permiten, además de la reconstrucción climatológica de la precipitación, estudiar los eventos extremos, los periodos secos y húmedos, la frecuencia de la precipitación y el inicio de la temporada de lluvias, por lo tanto, se puede mejorar la comprensión de los mecanismos asociados a la variabilidad del clima en escalas de tiempo más cortas. Por otro lado, la resolución espacial de 0,1° permite la observación de fenómenos de precipitación a escalas locales y evaluar el impacto de la lluvia sobre la agricultura y la gestión de recursos hídricos (Novella y Thiaw, 2013).

Para una descripción más completa del algoritmo ARC2 se puede consultar Novella y Thiaw (2013).

Descripción de los datos ARC2 descargados

Los datos ARC están disponibles en el servidor ftp de la NOAA (<ftp://ftp.cpc.ncep.noaa.gov/fews/fewsdata/africa/arc2/>) en formato binario, TIFF o shapefile con resolución temporal diaria desde el 1 de enero de 1983 hasta la actualidad.

El ámbito de los datos comprende todo el continente africano (longitud de 20° O a 55° E y latitud de 40° N a 40° S) con una resolución espacial de 0,1° y en milímetros (mm).

En total se han descargado 10614 archivos, de los cuales faltaban 341 días de los 30 años del periodo estudiado (Figura 3.4). Los años en los que más días faltan son los de la primera década.

	enero	febrero	marzo	abril	mayo	junio	julio	agosto	septiembre	octubre	noviembre	diciembre
1983	20	3	1	7		3	5		1		4	
1984	1	3				1		2	4	2	13	3
1985	8	10	7	4	4	1		1	1	2		2
1986	4	3	1	1	4	1	4	3	2	3	2	
1987		1	3	2		3	2	1	1			
1988	1		1				1		2	1	16	31
1989	5	2	1	6	4	1		1	2	2	4	2
1990	6	19	2	1				1		1	2	3
1991	5	1						1			2	
1992	1								2			1
1993	3	3	1	1		2		3	1	1	1	1
1994	1	1	1	1			1	1	1		1	1
1995	1			1			3		1	1		
1996												
1997					1					2		1
1998	1		2	1	1				1	1		1
1999	1								1			
2000												
2001	1	1										
2002												
2003												1
2004	2											
2005				1								
2006												
2007												
2008												
2009											2	
2010												
2011												
2012												

Figura 3.4. Número de días en los que no hay datos para los valores de estimación de precipitación ARC2.

3.2.3.2 TAMSAT

El grupo de investigación **Tropical Applications of Meteorology using SATellite data and ground-based observations** (TAMSAT, por su acrónimo en inglés) está formado por un equipo de científicos de la Universidad de Reading (Reino Unido) que investigan, desde mediados de la década 1980, el uso de imágenes de satélite en la estimación de precipitación y el balance hídrico superficial, principalmente en el continente africano.

El algoritmo TAMSAT (Grimes et al., 1999) fue desarrollado para proporcionar estimaciones de precipitación como aviso temprano de posibles casos de sequía y hambruna en África. Es utilizado por un gran número de servicios meteorológicos de países africanos y por la FAO en su programa de vigilancia regional de la sequía. El método de estimación de lluvia para el continente africano TAMSAT está basado en el reconocimiento de nubes de tormenta en la banda espectral del infrarrojo térmico. El método consiste en asociar a las nubes más frías una intensidad de precipitación a partir de cierto umbral. Tanto la intensidad de la precipitación como el umbral varían espacial y temporalmente. La banda del infrarrojo térmico del satélite METEOSAT se utiliza para calcular la duración en el tiempo que un píxel en el terreno está cubierto por una nube a cierta temperatura, sumado a un período de tiempo (10 días) se obtiene la estimación de precipitación del píxel para ese periodo. Se supone que existe una relación lineal entre la estimación de precipitación acumulada y la temperatura de la nube. La calibración de los datos se efectúa a través de una regresión lineal entre la estimación de precipitación y los datos procedentes de las estaciones meteorológicas situadas en la zona. Las estimaciones de lluvia por períodos de diez días se calculan sobre la base de los siguientes supuestos (Grimes et al., 1999):

1. La precipitación es predominantemente de origen convectivo. Las nubes que generan precipitación pueden ser identificadas como aquellas que, en su parte superior, la temperatura es menor que un cierto umbral (T)
2. El número de horas que un determinado píxel está más frío que la temperatura umbral (T) está linealmente relacionado con la precipitación durante el mismo período de tiempo:

$$R_s = a_0 + a_1 D + e$$

donde R_s es la precipitación sobre un determinado píxel, D la duración de la nube fría sobre el píxel y e el error con media cero.

3. El umbral de temperatura T y los parámetros a_0 , a_1 se pueden estimar para una región determinada y un momento dado del año a partir del análisis de los datos históricos para la región y época del año, y luego:

$$\widehat{R}_s = \hat{a}_0 + \hat{a}_1 D + e$$

Donde el acento circunflejo indica valores estimados.

En la práctica, T , a_0 y a_1 se han calculado una sola vez para cada mes del año y para un número de zonas de calibración de forma empírica (Figura 3.5). Las zonas se definen como áreas climáticamente homogéneas con pluviómetros suficientes para proporcionar una calibración estadísticamente fiable.

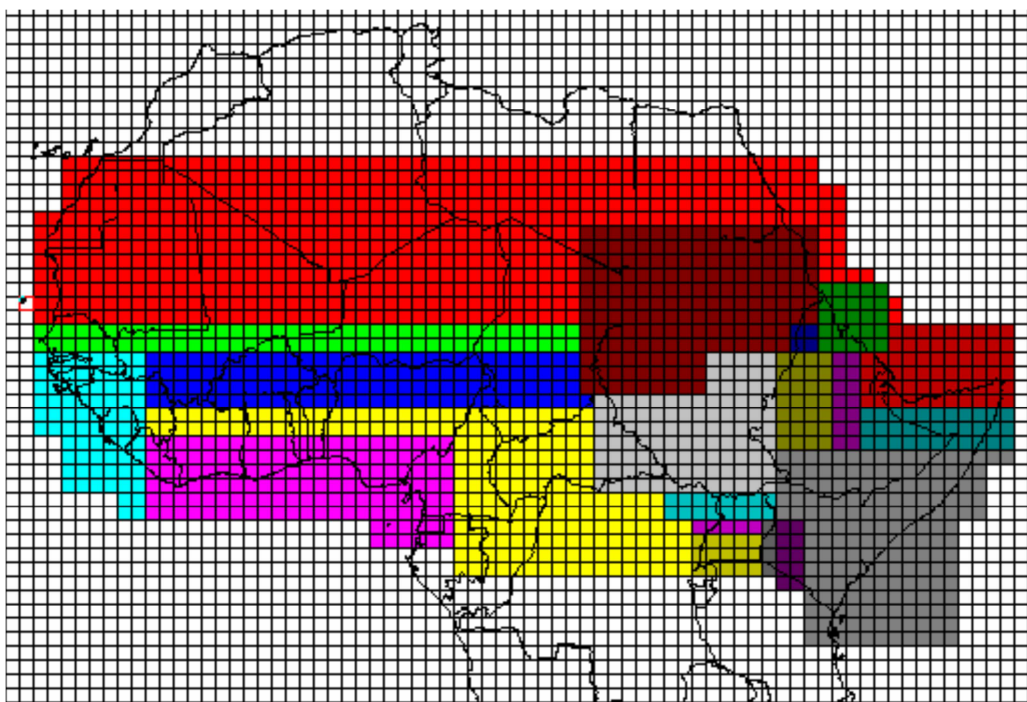


Figura 3.5. Zonas de calibración para el mes de agosto. Las zonas están influenciadas por características geográficas tales como montañas y costas. Varían de mes a mes en función de la progresión esperada de la ITCZ. Fuente: http://www.met.reading.ac.uk/~vm004202/TAMSAT_leaflet_v1.0.pdf.

Para calibrar una determinada zona, el umbral de temperatura se define como aquel que proporciona mejor acuerdo entre los datos de estaciones meteorológicas y el valor de la temperatura de la cima de la nube del píxel al que pertenece la estación contando también con la presencia o ausencia de precipitación. La calibración se realiza por separado para cada mes natural y los datos de las estaciones meteorológicas se basan en datos históricos suponiendo que son invariables durante largos períodos de tiempo (Grimes et al., 1999).

Para mayor información sobre el método se pueden consultar las referencias de Maidment et al. (2014), Tarnavsky et al. (2014), o la página web <http://www.met.reading.ac.uk/~tamsat/data/>.

Descripción de los datos TAMSAT descargados

En su página web se pueden descargar los datos TAMSAT de todo el continente africano (latitud de 35,9625° sur hasta 38,025° norte y longitud de 19,0125° oeste a 51,975° este) con una cobertura temporal que va de 1983 hasta la actualidad, resolución espacial de 0,0375° (sistema de referencia coordinado: WGS84 en latitud y longitud) y temporal de década (10 días). Los datos se facilitan en formato NetCDF.

En total son 1080 archivos, que han sido recortados al ámbito de estudio y agregados a resolución mensual.

Se desconoce el motivo por el que algunas décadas contienen graves errores o bien no están disponibles (Figura 3.6). Los datos que faltan han sido sustituidos teniendo en cuenta su pertenencia o no a la época de lluvias (de mayo a octubre). Para los datos que pertenecen a la época húmeda se ha calculado la media entre la década anterior y posterior y para archivos de la época seca se ha calculado la media de esa década a través de los 30 años de datos disponibles.

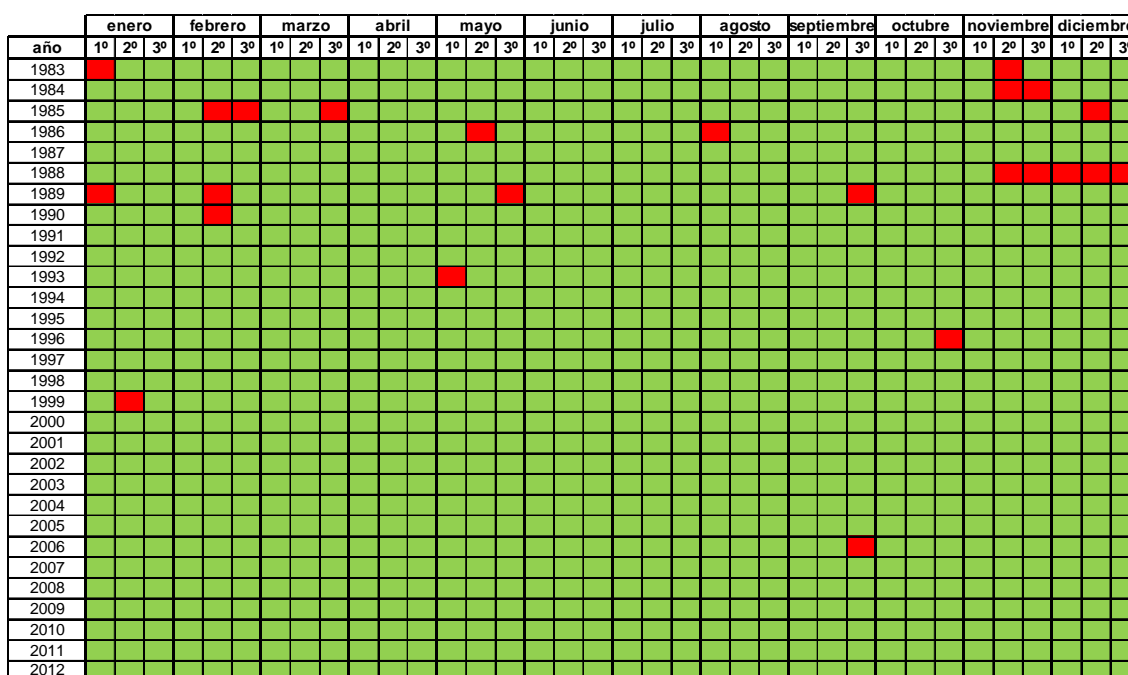


Figura 3.6. En color rojo las décadas no disponibles de los datos TAMSAT.

3.2.3.3 RFE 2.0

El algoritmo Rainfall Estimation versión 2 (RFE 2.0) está implementado por el Centro de Predicción Climática de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA, por su acrónimo en inglés) de EE. UU. para proporcionar estimaciones de precipitación del continente africano en respuesta a la necesidad de tener datos diarios con buena resolución espacial para ayudar a los programas humanitarios de la US Agency for International Development (USAID) / Famine Early Warning Systems Network (FEWS-NET).

La versión 1 del algoritmo RFE ha generado datos de estimación de lluvia desde el año 1995 hasta el 2000, en el que se combinan tres tipos de datos: 1) la temperatura de la nubes obtenidas cada 30 minutos a través de la banda infrarrojo térmico de los satélites geoestacionarios Meteosat; 2) valores pluviométricos diarios procedentes de unas 1000 estaciones existentes en todo el continente africano pertenecientes a la red GTS, y 3) la orografía más modelos de viento y humedad relativa.

En la versión 2 del algoritmo, RFE 2.0, operativa desde enero de 2001 y hasta la actualidad, se han añadido datos de dos satélites con sensores que obtienen valores en la región del microondas y ha eliminado los modelos de viento y humedad relativa, así como la orografía. Los cuatro tipos de datos de entrada de que consta este algoritmo son: 1) imágenes del satélite Advanced Microwave Sounding Unit (AMSU); 2) imágenes del Special Sensor Microwave Imager (SSM/I), capaz como las anteriores de medir estimaciones de precipitación cuatro veces al día; 3) la temperatura de la parte superior de las nubes medida cada 30 minutos en la banda del infrarrojo térmico (TIR, por su acrónimo en inglés) por los satélites Meteosat y calculada con el algoritmo Geostationary Operational Environmental Satellite (GOES) Precipitation Index (GPI), y 4) la precipitación diaria de las estaciones meteorológicas de la red GTS procedente de unos 1000 pluviómetros, aproximadamente.

De forma muy resumida, las estimaciones de precipitación RFE2.0 se consiguen por la combinación lineal ponderada de cada una de las imágenes y posteriormente se fusionan con los datos de las estaciones meteorológicas. En este proceso se calcula la estimación de precipitación con la banda del infrarrojo térmico usando el algoritmo GPI (Arkin et al., 1994), que utiliza dicha imagen para identificar las nubes con una temperatura por debajo de los 235K y les asigna una tasa de lluvia de 3 mm por hora. También se genera la estimación de precipitación a partir de los datos de los satélites AMSU y SSM/I en la región del microondas. Todas las estimaciones se fusionan mediante coeficientes de ponderación y, finalmente, se ajustan de acuerdo con los datos de los pluviómetros del GTS.

Para una descripción más completa del algoritmo RFE2.0 se puede consultar Xie y Arkin, (1996) o visitar la página web http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/fews/RFE2.0_tech.pdf.

Descripción de los datos RFE 2.0 descargados

Los datos RFE están disponibles en el servidor ftp de la NOAA (<ftp://ftp.cpc.ncep.noaa.gov/fews/fewsddata/africa/rfe2/>) en formato binario, TIFF o shapefile con resolución diaria desde el 1 de enero de 2001 hasta la actualidad.

El ámbito de los datos comprende todo el continente africano (longitud de 20° O a 55° E y latitud de 40° N a 40° S) con una resolución espacial de 0,1° y las unidades de medida son milímetros (mm).

En total se han descargado 4380 archivos, de los cuales faltaban 3 días, que se han sustituido por el promedio entre el antecesor y predecesor del día que falta.

3.2.3.4 TRMM-3B42

El conjunto de datos de precipitación 3B42 es uno de los productos de la Misión de Medida Pluviométrica Tropical (*Tropical Rainfall Measuring Mission*, TRMM). Se genera por el análisis de los datos de estimaciones de precipitación de múltiples satélites, así como por la calibración de datos procedentes de estaciones meteorológicas, con resolución espacial de 0,25° y temporal de 3 horas, y cobertura global entre el paralelo 50° N y 50° S.

El proyecto TRMM, que se puso en funcionamiento a finales de 1997, es una misión conjunta entre la NASA y JAXA, la agencia espacial japonesa. La novedad de esta misión es la utilización por primera vez de dos instrumentos de microondas, activo y pasivo, con una órbita baja (de inclinación 35°), que han hecho que los datos TRMM sean importantes en el estudio de las precipitaciones, tormentas asociadas y los procesos climáticos en los trópicos.

El algoritmo que permite obtener las estimaciones de precipitación TRMM consta de cuatro pasos. En primer lugar, datos de instrumentos que funcionan en la frecuencia del microondas pasivo con satélites de órbita baja terrestre (Low Earth Orbit, LEO) como son de los satélites LEO: SSM SSM/I, TMI, AMSR-E, AMSU-B. Estos valores se convierten en estimaciones de la precipitación mediante el algoritmo Goddard Profiling Algorithm (GPROF, por sus siglas en inglés) (Kummerow et al., 2001); a continuación, las estimaciones de la precipitación se evalúan con los valores mensuales de calibración obtenidos por el instrumento TRMM Microwave Imager (TMI, por sus siglas en inglés), que se combinan a una resolución espacial de 0,25°. El segundo paso utiliza los datos de precipitación resultante de la banda del infrarrojo, que provienen de los satélites siguientes: Satélite Meteorológico Geoestacionario (GMS, por sus siglas en inglés), Geostationary Operational Environmental Satellite GOES-E, GOES-W, Meteosat-7, Meteosat-5, datos de GEO-IR y series NOAA, para crear las estimaciones de precipitación calibradas. Durante la tercera etapa, las estimaciones de precipitación derivadas de la banda espectral del microondas e infrarrojo en las etapas anteriores se combinan en cada píxel para cada resolución temporal. En el paso final se incorporan los datos pluviométricos de estaciones meteorológicas terrestres; para ello las estimaciones de precipitación calculadas cada 3 horas se transforman en mensuales y se combinan con datos de estaciones meteorológicas como en Huffman et al. (1997), con lo cual se obtiene el producto de escala mensual TRMM 3B43. Posteriormente, se cambian de escala temporal los datos mensuales a datos de 3 horas y el resultado es el producto TRMM 3B42.

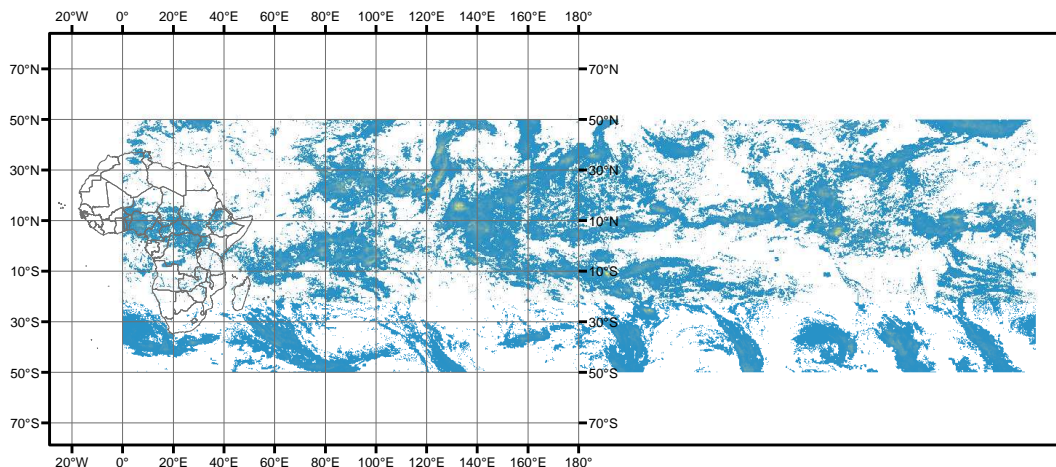


Figura 3.7. Estimación de precipitación TRMM 3B42 del día 13 de agosto de 2007.

Una descripción más completa del producto TRMM 3B42 se puede encontrar en Huffman et al. (2007).

Descripción de los datos TRMM 3B42 descargados

Los datos TRMM 3B42 versión 7 se pueden descargar desde el servicio de datos Mirador de la NASA.

Aunque las estimaciones de precipitación TRMM-3B42 tienen una resolución temporal de 3 horas, los datos están disponibles con una resolución temporal de 24 horas, y estos han sido los que se han descargado, en total 4383 archivos (Figura 3.7).

El formato en el que se pueden descargar los datos es binario o NetCDF, en este caso se ha optado por la descarga en formato NetCDF; posteriormente cada imagen se ha transformado de 180° O a 180° E de longitud para poder recortar el área de estudio; para finalizar se han agrupado los valores de precipitación diaria a mensual.

3.2.3.5 GPCP-1dd.

El Proyecto de Climatología de las Precipitaciones Mundiales (Global Precipitation Climatology Project, GPCP), establecido por el Programa Mundial de Investigaciones Climáticas, ha desarrollado un procedimiento de análisis para combinar las distintas estimaciones de precipitaciones derivadas de satélites de observación disponibles en la actualidad y los datos de estaciones meteorológicas con el objeto de producir datos espaciales de precipitación en formato ráster. El algoritmo un grado diario (*one-degree daily*, 1dd) utiliza el Threshold-Matched Precipitation Index (TMPI), adaptado del enfoque del Índice de Precipitación GOES (GOES Precipitation Index, GPI). En el producto GPCP-1dd se fija un umbral de temperatura de brillo en la banda del infrarrojo y se obtiene una estimación de precipitación, a nivel local y mensual, conseguida desde satélite a través de los datos que ofrecen el SSM/I (Jobard et al., 2011).

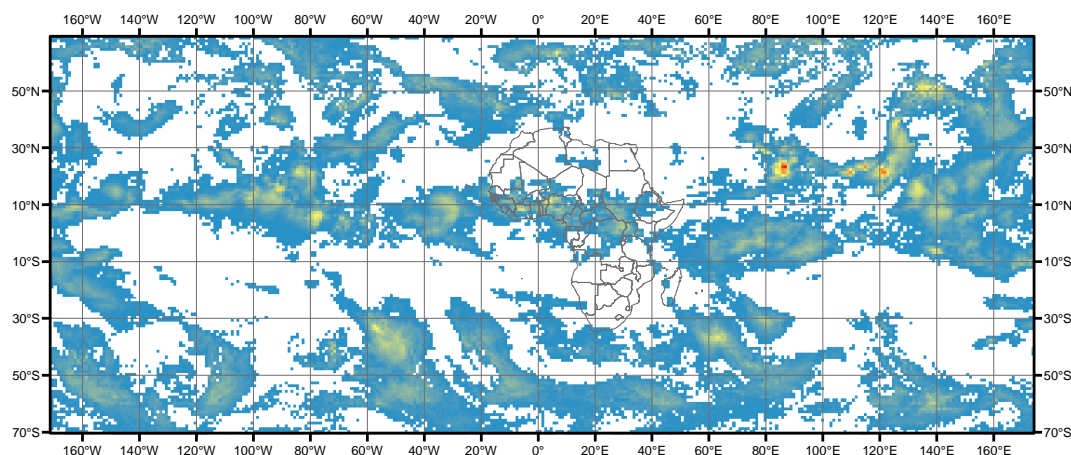


Figura 3.8. Estimación de la precipitación GPCP-1dd el día 13 de agosto de 2007.

Las resoluciones temporales y espaciales del producto GPCP-1dd son de 1 día y 1°, respectivamente, y tienen cobertura global (Figura 3.8). Este producto está disponible desde octubre de 1996 hasta la actualidad y sus datos se distribuyen con 2 meses de retraso, ya que necesitan valores de precipitación mensual para ser calculados. Se puede consultar más información del producto en la referencia bibliográfica Huffman et al. (2001).

Descripción de los datos GPCP-1dd descargados

Los datos GPCP-1dd están disponibles en el servidor de la NOAA (<http://www1.ncdc.noaa.gov/pub/data/gpcp/1dd-v1.2/>) en formato binario, con resolución temporal diaria desde el 10 de noviembre de 1996 hasta la actualidad.

En total se han descargado 144 archivos, cada uno de ellos contenía los 28, 29, 30 o 31 días del mes correspondiente. Para poder manipular los archivos se ha escrito una pequeña rutina en el software R que ha permitido obtener 4383 archivos, uno por día, que posteriormente se han agregado a resolución mensual, y recortado al ámbito de estudio.

3.3 Datos de vegetación

3.3.1 AVHRR GIMMS3g

El sensor Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR, por sus siglas en inglés) ha sido crucial en el estudio de la dinámica de la vegetación y su variación en el tiempo. Los primeros sensores AVHRR que han permitido obtener datos del NDVI son el AVHRR/2, que ha estado en órbita desde julio de 1981 hasta noviembre de 2000, y el AVHRR/3, que ha estado en órbita desde noviembre de 2000 hasta el presente. Estos instrumentos han estado embarcados en catorce satélites de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de EE. UU. (NOAA, por sus siglas en inglés).

Aunque los sensores AVHRR no estaban destinados originalmente a una misión climática (Cracknell, 2001), su éxito en estudios de vegetación se debió a una reconfiguración de los instrumentos en el que no se superponen las bandas espectrales del visible (canal 1, 0,58 hasta 0,68 μm) y del infrarrojo cercano (canal 2, 0,725 a 1,10 μm) y que permiten calcular el valor del NDVI. Sin embargo, existen ciertas dificultades para calcular el NDVI por las limitaciones del sensor AVHRR, como son la calibración post lanzamiento, correcciones atmosféricas o la deriva orbital sistemática durante la vida útil de cada una de las misiones y la hora de paso.

La calibración del instrumento es un prerrequisito para observar y documentar la variabilidad del suelo y es especialmente difícil para el AVHRR, porque, por su diseño, el instrumento no tiene ningún mecanismo que permita la calibración a bordo, y debe contar con referencias externas (es decir, una calibración indirecta). Varias fuentes de radiación se han utilizado como referencias externas como métodos de calibración de los canales 1 y 2 del sensor AVHRR, incluyendo objetivos terrestres estables, como desiertos, la dispersión de la superficie del mar y la reflexión de brillo del sol o de las nubes, y los glaciares de la Antártida y Groenlandia. Los canales 1 y 2 son sensibles a las condiciones atmosféricas, ya que son espectralmente amplios y, por lo tanto, ambos requieren datos adicionales para corregir efectos de los aerosoles y la contaminación por nubes.

A la deriva orbital de los satélites NOAA-7 al NOAA-14 hay que añadirle el tiempo de paso del satélite, que ha derivado de las 13:30 horas a 4,5 horas de retraso, lo cual ha creado una iluminación variable y diferentes ángulos de visión. Las órbitas se han ido estabilizando a partir del satélite NOAA-16.

A pesar de las limitaciones del diseño de sensor AVHRR, la gran ventaja es la duración de la serie temporal, factor que ha provocado que las mejoras en el diseño del sensor hayan sido limitadas puesto que podrían afectar a la continuidad de los datos. Sin embargo, a partir de la década de 1990 se ha elaborado una base de datos de estimaciones precisas y frecuentes del espesor óptico de aerosoles, proporcionados por una red de fotómetros solares repartidos por todo el mundo, que ha permitido avanzar en la monitorización de los efectos de los aerosoles en el clima y ha validado y mejorado los conjuntos de datos de espesor óptico de aerosoles derivados de los nuevos sensores embarcados en satélites. La NOAA introdujo dos nuevas funciones a la nueva serie que lleva el instrumento AVHRR/3. En primer lugar, las órbitas de los satélites NOAA/15-19 se han estabilizado para proporcionar una iluminación en la escena coherente en los canales 1 y 2 del sensor. En segundo lugar, se ha incrementado el extremo inferior del rango dinámico de las radianzas utilizando una cuantificación doble de ganancia en los canales 1 y 2 del instrumento AVHRR/3 para mejorar la detección de aerosoles de océano.

Los datos procedentes del sensor AVHRR han sido calibrados/reprocesados varias veces para hacerlos compatibles con los datos de sensores más recientes y que proporcionan valores del

NDVI de calidad constatada. El grupo Global Inventory Modeling and Mapping Studies (GIMMS, por sus siglas en inglés) ha realizado varias calibraciones que han dado lugar a diversos conjuntos de datos del NDVI. La segunda generación de datos AVHRR GIMMSg calibró los datos AVHRR respecto a los SPOT4 para producir una serie de tiempo bimensual de 1981 a 2006 (Tucker et al., 2005). Varios estudios corroboraron la similitud con otros conjuntos de datos (Beck et al., 2011; Fensholt et al., 2006a). Sin embargo, algunas inconsistencias fueron encontradas en latitudes septentrionales altas debido principalmente al truncamiento de los datos SPOT4 para latitudes superiores a los 72° N. La versión 3, AVHRR GIMMS3g, se ha procesado utilizando en la calibración un procesamiento bayesiano que ha permitido obtener un conjunto coherente de datos del NDVI no estacionarios para cuantificar la variabilidad estacional e interanual de la vegetación.

La información comentada en este epígrafe se ha obtenido de Pinzon y Tucker (2014); se recomienda su lectura como ampliación sobre las características técnicas de los datos.

Descripción de los datos AVHRR GIMMS3g descargados

Los datos AVHRR se pueden descargar desde la página web <http://ecocast.arc.nasa.gov/data/pub/gimms/3g/>. El formato de los datos es binario y se ha escrito una pequeña rutina en R que permite convertirlos a formato tif y recortarlos al ámbito de estudio.

3.3.2 SPOT VEGETATION

El programa Satellites Pour l'Observation de la Terre (SPOT, por su acrónimo en francés) se creó en 1978 por la agencia espacial francesa en colaboración con las agencias espaciales belga y sueca.

La constelación de satélites SPOT tiene una órbita heliosíncrona cuasi circular, con una inclinación de 98,7° respecto al plano del ecuador, un periodo orbital de 101 minutos y una altitud de 820 km, que cubre un ancho de 2.250 km sobre el terreno. Cruza el ecuador a las 10:30 hora solar local.

Los satélites SPOT están dotados de dos sensores idénticos de alta resolución en la banda espectral del óptico (Tabla 3.2) que pueden operar simultáneamente o de forma individual, ya sea en modo multiespectral (tiene 4 bandas espectrales que van del verde al infrarrojo medio) o en modo pancromático (una única banda dentro de la banda del visible). El ángulo de inclinación del sensor se puede modificar desde tierra, para cada uno de los sensores, ofreciendo una capacidad de visualización oblicua con ángulos de hasta $\pm 27^\circ$ desde el eje vertical del satélite. De esta manera, la resolución temporal se acorta de 26 a 4 o 5 días.

Tabla 3.2. Resolución espectral de la bandas de los sensores SPOT-VGT

Banda espectral	Diseñados	SPOT-VGT1 (valores reales)	SPOT-VGT2 (valores reales)
Azul (B0)	0,430 - 0,470 μm	0,437 - 0,480 μm	0,438 - 0,475 μm
Rojo (B2)	0,610 - 0,680 μm	0,615 - 0,700 μm	0,615 - 0,690 μm
Infrarrojo cercano (B3)	0,780 - 0,890 μm	0,772 - 0,892 μm	0,782 - 0,890 μm
Infrarrojo medio (MIR)	1,580 - 1,750 μm	1,600 - 1,692 μm	1,582 - 1,685 μm

El programa VEGETATION está cofinanciado por la Unión Europea, Bélgica, Francia, Italia y Suecia, y opera bajo la supervisión del CNES (Centro Nacional de Estudios Espaciales, Francia). El objetivo del instrumento VEGETATION es proporcionar mediciones precisas de las

principales características de la cubierta vegetal de la Tierra. Proporciona cobertura global diaria con una resolución espacial de 1 km, estas características convierten este sensor en una herramienta ideal para la observación de los cambios ambientales a largo plazo.

El sensor VEGETATION (SPOT-VGT) funciona independientemente de los sensores de alta resolución y opera en cuatro bandas espectrales (azul, rojo, infrarrojo cercano y medio). El instrumento SPOT-VGT tiene un ángulo de visión bastante amplio, con pasadas de 2.250 km de ancho sobre la superficie terrestre; este instrumento es capaz, de esta manera, de cubrir la casi totalidad de la Tierra en un solo día.

El programa VEGETATION está compuesto por el sensor SPOT VEGETATION 1 y 2 embarcado en los satélites SPOT 4 y 5, respectivamente, en operación desde abril de 1998 el VGT1 y desde mayo de 2002 el VGT2. Actualmente, ninguno de los dos sensores permanece en órbita, el satélite SPOT 4 dejó de funcionar en junio de 2013 y el sensor SPOT-VGT2 en mayo de 2014, pero el programa VEGETATION continúa con el nuevo satélite PROBA-V de la ESA, que permite continuar monitorizando la vegetación pero con una mayor resolución espacial.

Los dos sensores SPOT-VGT (VGT1 y VGT2) han proporcionado observaciones globales que se distribuyen en forma de compuestos de 10 días (S10), compuestos diarios (S1) y segmentos (P-productos).

Los productos VGT-S10 son los conjuntos de datos que se utilizan con más frecuencia, y han sido los utilizados en esta tesis, están basados en los datos VGT-P a los que se ha aplicado todas las correcciones posibles a fin de generar valores de reflectancia y elaborar el NDVI. Estos datos son la síntesis de 10 días consecutivos de medida, basados en una selección de la «mejor» medición de todo el período. La selección se basa en el valor máximo del NDVI.

Para una ampliación sobre las características técnicas del sensor VEGETATION se pueden consultar las referencias bibliográficas Aitkenhead (2014), Deronde et al. (2014) y Maisongrande et al. (2004), o consultar el sitio web www.spot-vegetation.com.

Descripción de los datos SPOT-VGT descargados

Los datos del sensor VEGETATION se pueden descargar desde la web de VITO (www.vito-eodata.be) por continentes. El mismo sitio ofrece un pequeño programa informático, VGTextract, que permite de forma intuitiva y fácil descomprimir y recortar los archivos al formato que se desee. En total se han descargado y procesado 531 archivos.

3.3.3 MODIS

El sensor Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS, por sus siglas en inglés), a bordo de los satélites de observación de la tierra Terra y Aqua, es un instrumento fundamental que proporciona datos de la cubierta terrestre, la atmosfera y la dinámica oceánica. Las características del sensor MODIS de los satélites Terra y Aqua son idénticas, la diferencia se encuentra en la órbita y la hora de paso por el ecuador de cada uno de los satélites. Mientras que el satélite Terra cruza el ecuador a las 10:30 hora local en modo descendente, el satélite Aqua lo hace a las 13:30 en modo ascendente. Los dos satélites tienen una órbita heliosíncrona circular a una altura de 705 km. Los primeros datos del sensor MODIS embarcado en el satélite Terra se obtuvieron en febrero de 2000 y en julio de 2002 los procedentes del satélite Aqua.

El sensor MODIS tiene 36 bandas espectrales que abarcan desde la franja del espectro visible (415 nm) a la del infrarrojo (14235 nm) con resoluciones espaciales de 1 km, 500 m y 250 m en el nadir y una resolución radiométrica de 16 bits (Ramachandran et al., 2011).

Tabla 3.3. Productos de índices de vegetación del sensor MODIS en los satélites Terra y Aqua.

Índices de Vegetación MODIS Terra	Índices de Vegetación MODIS Aqua
MOD13Q1: 16 días 250 m	MYD13Q1: 16 días 250 m
MOD13A1: 16 días 500 m	MYD13A1: 16 días 500 m
MOD13A2: 16 días 1 km	MYD13A2: 16 días 1 km
MOD13A3: mensual 1 km	MYD13A3: mensual 1 km
MOD13C1: 16 días 0,05°	MYD13C1: 16 días 0,05°
MOD13C2: mensual 0,05°	MYD13C2_ mensual 0,05°

A partir de estas 36 bandas espectrales se fabrican un gran número de productos científicos que sirven para analizar temáticas concretas: los océanos (MOcean), la atmósfera (MODIS Atmosphere), la criosfera y las cubiertas terrestres (MODLAND). En esta tesis se ha utilizado el producto **MOD13A2**, que proviene de la gama de productos MODLAND, en concreto de aquellos dedicados a los índices de vegetación (Tabla 3.3).

MOD13A2 se procesa desde nivel 2 del Terra-MODIS (L2G). El nivel 2 de corrección de los datos proporciona la reflectancia de la superficie diaria (serie MOD09), que provee la reflectancia superficial de las bandas del rojo e infrarrojo cercano corregido el efecto de los gases atmosféricos, las nubes y los cirros delgados y aerosoles, con los que se elabora el NDVI.

El valor añadido de la gama de productos MODIS respecto a otros sensores son los parámetros de salida conocidos como conjuntos de datos científicos y que incorporan valores complementarios y de calidad de los mismos (Tabla 3.4).

Tabla 3.4. Archivos que contiene el producto MODIS MOD13A2

Archivos MOD13A2, capas HDF (12)	Unidades	Bit	Valor de las celdas sin datos	Rango de valores	Factor multiplicador
1 km 16 días NDVI	NDVI	16-bit enteros con signo	-3000	-2000 a 10000	0,0001
1 km 16 días EVI	EVI	16-bit enteros con signo	-3000	-2000 a 10000	0,0001
1km 16 días IV Calidad detallada(QA)	Bits	16-bit enteros sin signo	65535	0 a 65534	NA
1 km 16 días banda 1, rojo (620-670 nm)	reflectancia	16-bit enteros con signo	-1000	0 a 10000	0,0001
1 km 16 días banda 2, infrarrojo cercano, (841-876 nm)	reflectancia	16-bit enteros con signo	-1000	0 a 10000	0,0001
1 km 16 días banda 3, azul (459-479 nm)	reflectancia	16-bit enteros con signo	-1000	0 a 10000	0,0001
1 km 16 días banda 7, infrarrojo medio (2,105-2,155 nm)	reflectancia	16-bit enteros con signo	-1000	0 a 10000	0,0001
1 km 16 días ángulo de visión cenital del sensor	grados	16-bit enteros con signo	-10000	-9000 a 9000	0,01
1 km 16 días ángulo cenital solar	grados	16-bit enteros con signo	-10000	-9000 a 9000	0,01
1km 16 días acimut relativo	grados	16-bit enteros con signo	-4000	-3600 a 3600	0,1

Archivos MOD13A2, capas HDF (12)	Unidades	Bit	Valor de las celdas sin datos	Rango de valores	Factor multiplicador
1 km 16 días julianos que conforman el producto	día juliano	16-bit enteros con signo	-1	1 a 366	NA
1 km 16 días resumen de fiabilidad	rango	8-bit enteros con signo	-1	0 a 4	NA

Los archivos más importantes en los análisis que se efectuaran en esta tesis corresponden a «1 km 16 días NDVI» y el archivo de calidad «1km 16 días IV Calidad detallada (QA)».

Los bits de cada una de las celdas de la imagen del archivo de calidad detallada contienen información sobre el procesado y la existencia de nubes, aerosoles, sombras, hielo, nieves. Los bits de esta imagen se leen de derecha a izquierda (Tabla 3.5).

Tabla 3.5. Descripción del bit (leído de derecha a izquierda) de la imagen de calidad detallada del producto MOD13A2.

bit	Nombre	Valor	Key
0-1	Resumen de fiabilidad.	00	Índice de vegetación producido, buena calidad.
		01	Índice de vegetación producido, pero comprueba otro parámetro de calidad.
		10	Pixel producido, pero más probablemente nublado.
		11	Pixel no producido debido a otras razones diferentes que las nubes.
2-5	Índice de Vegetación utilidad.	0000	La calidad más alta.
		0001	Baja calidad.
		0010	Disminución de la calidad.
		0100	Disminución de la calidad.
		1000	Disminución de la calidad.
		1001	Disminución de la calidad.
		1010	Disminución de la calidad.
		1100	La calidad más baja.
		1101	La calidad tan baja que no es útil.
		1110	Datos L1B defectuosos.
		1111	No es útil por cualquier otra razón / no procesada.
6-7	Cantidad de aerosoles.	00	Climatología.
		01	Baja.
		10	Normal.
		11	Alta.
8	Nube adyacente detectada.	1	Sí.
		0	No.
9	Correcciones atmosféricas BRDF realizadas.	1	Sí.
		0	No.
10	Nubes mixtas.	1	Sí.
		0	No.

11-13	Marcadores de Tierra/Agua.	000	Océano poco profundo.
		001	Tierra (Nada más que tierra).
		010	Costas del océano y costas de lago.
		011	Aguas continentales poco profundas.
		100	Agua efímera.
		101	Aguas continentales profundas.
		110	Moderadas u océano continental.
		111	Océano profundo.
14	Posible nieve/hielo.	1	Sí.
		0	No.
15	Posible sombra.	1	Sí.
		0	No.

Para más información sobre las características de los datos MODIS en general y el producto MOD13A2 en particular se pueden consultar las referencias Huete et al. (2002), Mas (2011), o la página web https://lpdaac.usgs.gov/products/modis_products_table/mod13a2.

Descripción de los datos MOD13A2 descargados

Los datos MOD13A2 se han descargado desde el sitio Reverb de la NASA (<http://reverb.echo.nasa.gov>) en formato HDF y en proyección cartográfica sinusoidal con modelo esférico. El producto se ofrece en «tiles» y para cubrir la zona de estudio es necesario descargar 3 archivos (h16 v07; h17 v07; h18 v07), en total 888 archivos.

El primer paso ha sido enmascarar aquellas celdas que no garantizaban unos parámetros óptimos de calidad. Los criterios utilizados han sido:

- Bit 0-1 <= 01
- Bit 2-5 <= 1010
- Bit 6-7 <= 01
- Bit 8 = 0
- Bit 10 = 0
- Bit 15 = 0

Posteriormente, se ha cambiado la proyección cartográfica a coordenadas geográficas, se han unido las 3 «tiles» para posteriormente recortar al ámbito exacto de estudio. Para la realización de cada uno de estos pasos se han escrito pequeñas rutinas que han facilitado el procesado de los archivos.

CAPÍTULO 4 Aspectos metodológicos

4.1 Introducción

La mayoría de datos con los que se ha trabajado en esta Tesis doctoral están en formato ráster; algunos proceden de una interpolación a partir de datos de estaciones meteorológicas y otros son el resultado de aplicar algoritmos o índices a medidas tomadas por satélite a partir de los cuales se obtienen mapas ráster de estimaciones de precipitación o de índices de vegetación.

Los datos de precipitación y de vegetación proceden de distintas fuentes, su resolución espacial, temporal y radiométrica es diversa y su ámbito geográfico también. Por ello, antes de realizar cualquier procesamiento es importante unificar el sistema de referencia de coordenadas de las variables, sus resoluciones, así como su estandarización para poderlas comparar.

4.2 Índice de vegetación de diferencia normalizada

El comportamiento radiométrico de la vegetación en las imágenes de satélite está claramente diferenciado entre las bandas espectrales del rojo (longitud de onda comprendida entre 0,6 y 0,7 μm) y el infrarrojo próximo (longitud de onda comprendida entre 0,7 y 1,1 μm). En la banda del rojo, la vegetación sana absorbe la mayor parte de la energía que recibe, pero no pasa lo mismo en la banda del infrarrojo próximo (Figura 4.1).

Este hecho produce un fuerte contraste entre la baja reflectividad en la banda roja y la alta reflectividad del infrarrojo próximo, que permite separar la vegetación sana de otras coberturas. Cuando la vegetación tiene algún tipo de estrés, su reflectividad en el infrarrojo próximo disminuye y aumenta en el rojo, haciendo que el contraste entre bandas sea menor (Figura 4.1). En resumen, se puede decir que el mayor contraste entre bandas indica una vegetación sana y, análogamente, valores bajos de contraste indican una vegetación enferma o poco densa (Chuvieco, 2008).

Los índices de vegetación son combinaciones de bandas espectrales que tienen como función realzar la contribución de la vegetación en la respuesta espectral de una superficie y atenuar la de otros factores como el suelo, el relieve (pendiente y orientación), las condiciones de iluminación y la atmósfera, que pueden producir interferencias en la señal radiométrica.

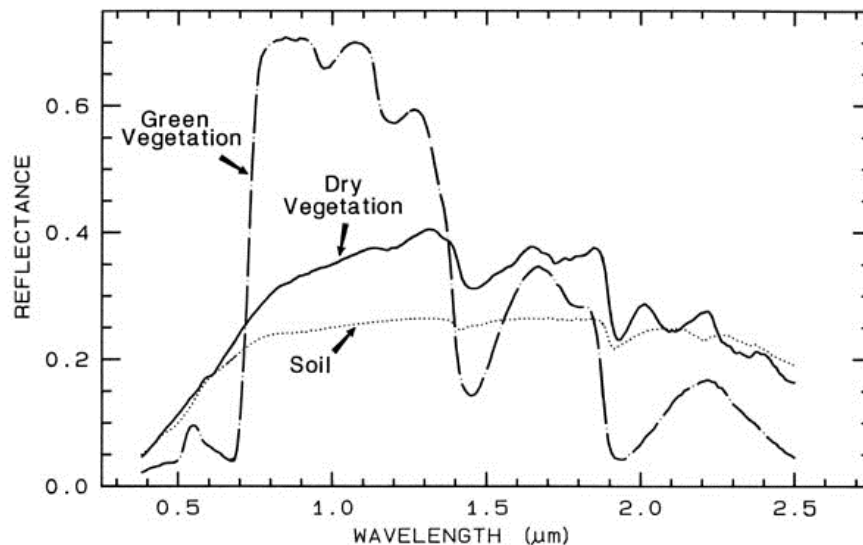


Figura 4.1. Respuesta espectral de la vegetación y del suelo (fuente: <http://bluemarble.ch/wordpress/2003/01/07/>).

El índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI, por sus siglas en inglés) es uno de los más utilizados (Rouse JR et al., 1973; Tucker, 1979):

$$NDVI_i = \frac{\rho_{i,IRP} - \rho_{i,R}}{\rho_{i,IRP} + \rho_{i,R}} \quad \text{Ecuación 4.1}$$

Donde $\rho_{i,IRP}$ y $\rho_{i,R}$ indican la reflectancia del píxel i en las bandas del infrarrojo próximo (IRP) y del rojo (R), respectivamente (Campbell y Wynne, 2011).

El rango de valores que toma el NDVI está comprendido entre -1 y 1, lo que facilita su interpretación. Podemos señalar como umbral crítico para coberturas vegetales un valor de NDVI por encima de 0,1; y para la vegetación densa, un valor a partir de 0,5 (Chuvieco, 2008).

Este índice se ha utilizado en numerosos estudios de vegetación (véase, por ejemplo Anyamba et al., 2014; Beck et al., 2011; Fensholt et al., 2006; Pouliot et al., 2009).

En conclusión, los índices de vegetación, como el NDVI, son una herramienta de gran interés a la hora de hacer un seguimiento de la cubierta vegetal de la superficie terrestre, ya que permite prever sequías, riesgos de incendio, deforestación, etcétera. Aunque hay que tener cierta cautela cuando se trabaja con él, ya que existen algunos factores que pueden afectar la calidad de los resultados. Algunos de estos factores están asociados al momento de adquisición de la imagen, como por ejemplo la cantidad de vapor de agua o aerosoles contenidos en la atmósfera, o bien la presencia de nubes finas y sombras de nubes que pueden contaminar las mediciones. Otro factor que puede influir en la calidad del resultado son los diferentes anchos de banda espectrales con los que se ha diseñado cada sensor, de manera que pueden proporcionar resultados diferentes en mediciones adquiridas por diferentes instrumentos sobre el mismo territorio.

4.3 Análisis de una serie climática

Una parte de los datos proviene directamente de las estaciones meteorológicas situadas en la zona y que pertenecen a la OMM. Es necesario estudiar su calidad y compararla con los datos de los mapas GPCC y CRU.

4.3.1 Comparación de variancias

La variancia mide la dispersión de la medida y se expresa como la media de los cuadrados de las diferencias entre cada valor y la media del conjunto. Se simboliza como s^2 , para una muestra, y σ^2 para una población.

Una serie climática de precipitación con una variancia pequeña indica poca variabilidad de la precipitación a lo largo del tiempo; por el contrario, una variancia alta implica mucha variabilidad de la precipitación. Por ejemplo, una serie climática de datos anuales de precipitación con una variancia elevada respecto a la media implica que se han sucedido años de considerable precipitación con otros de poca precipitación respecto a la media de la serie.

Para comparar series pluviométricas es importante analizar las variancias y para ello se utiliza la distribución estadística F de Snedecor (Chandler y Scott, 2011). Hay que suponer que las muestras cumplen una distribución normal o cuasnormal. Para admitir o descartar que las variancias de dos muestras de series distintas de una misma variable son similares o significativamente diferentes se construye el estadístico de contraste experimental F dado por:

$$F_{observada} = \frac{\max(s_1^2; s_2^2)}{\min(s_1^2; s_2^2)} \quad \text{Ecuación 4.2}$$

Se busca el valor crítico en la tabla de la distribución F -Snedecor con v_1 grados de libertad del numerador (número de valores de la muestra menos 1) y v_2 grados del denominador. En el caso de que el valor de la $F_{observada}$ sea inferior al valor crítico ($p\text{-valor} > 0,05$) se considera que las dos variancias son iguales (homogéneas). En caso contrario habría que rechazar la igualdad de las variancias.

4.3.2 Test de homogeneidad de una serie climática

El test de homogeneidad en una serie climática se utiliza para descartar los posibles factores no climáticos que pueden perturbar los valores en la serie dejando así de reflejar el comportamiento natural de la variable en cuestión; por ejemplo, cambios en la instrumentación de medida, en la ubicación de una estación meteorológica o en el entorno de la estación, errores de codificación, etc. Estos factores pueden provocar cambios en el nivel medio de las observaciones, discontinuidades en los datos y en la tendencia, etc.

Fenómenos naturales como por ejemplo la sucesión de años muy húmedos o muy secos en una serie de precipitación no hay que entenderlos como motivo para decidir si la serie es homogénea o no, ya que estos fenómenos son naturales y su variabilidad obedece únicamente a causas climáticas.

Los test de homogeneidad se pueden clasificar en dos grupos: los de homogeneización absoluta y los de homogeneización relativa. Los test de homogeneización absoluta se basan en procedimientos estadísticos y en la aleatoriedad de la misma serie sin compararla con otra serie próxima. En cambio, los test de homogeneización relativa comparan la serie con otra

serie patrón que es homogénea y que se encuentra a una distancia cercana de la estación que se analiza.

En el Sahel se hace difícil encontrar alguna serie procedente de alguna estación meteorológica que se pueda utilizar como referencia para ser comparada, a lo que hay que añadir el problema de la falta de metadatos. De manera que en esta tesis los test de homogenización a los que se someten las series de precipitación serán test absolutos como el de von Neumann y el de Thom, conocido también como el test de las rachas, y ambos se utilizarán para comprobar si la serie es homogénea o no, pero no se modificarán sus valores. Los dos test están recomendados por la OMM.

4.3.2.1 Test de von Neumann

El test de Von Neumann (Von Neumann, 1941) está definido por la ratio siguiente:

$$\eta = \frac{\delta^2}{s^2} \quad \text{Ecuación 4.3}$$

Donde s^2 es la varianza,

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad \text{Ecuación 4.4}$$

\bar{x} es el valor medio de la serie y n el número de datos de los que consta la serie; y δ^2 es la diferencia de las medias sucesivas al cuadrado:

$$\delta^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} (x_{i+1} - x_i)^2 \quad \text{Ecuación 4.5}$$

Y se aplica para determinar si existe o no independencia entre los datos de la serie. En el caso de homogeneidad se esperaran valores comprendidos entre 1,7 y 2,3 o incluso valores entre 1,6 y 2,4 si las series son de valores pluviométricos anuales (Martín Vide, 2003). En caso de existir alguna falta de homogeneidad, el valor está fuera de la horquilla indicada el test no aporta información sobre la localización de la inhomogeneidad si existiera.

4.3.2.2 Test de Thom

El test no paramétrico de Thom, o test de las rachas, evalúa la homogeneidad absoluta de una serie temporal de datos climáticos. Este test es analíticamente muy simple y consiste en hallar el número de rachas o tramos de la serie que quedan por encima o debajo de la mediana, simbolizado mediante R . El estadístico se define como:

$$Z = \frac{\left(R - \frac{(n+2)}{2}\right)}{\sqrt{\frac{n(n-2)}{4(n-1)}}} \quad \text{Ecuación 4.6}$$

Donde n es el número de datos que contiene la serie climática. Si $|Z| < 2,58$, la serie puede considerarse aleatoria y, por lo tanto, homogénea, al nivel de significación $\alpha = 0,01$, mientras que si $|Z| < 1,96$, lo es con $\alpha = 0,05$ (Martín Vide, 2003).

4.4 Estadísticos básicos

4.4.1 Cálculo de anomalías estandarizadas

Para poder comparar diferentes tipos de variables (precipitación, NDVI) reduciendo la influencia de la media de los valores, es útil calcular sus anomalías estandarizadas respecto a un mismo periodo de tiempo. Las anomalías estandarizadas o valores de z se calculan como:

$$z = \frac{x - \bar{x}}{\sigma} \quad \text{Ecuación 4.7}$$

Donde x es el dato que se estandariza, \bar{x} es la media de la población en el periodo de referencia y σ es la desviación estándar para el mismo periodo que la media.

4.4.2 El sesgo (BIAS)

El sesgo (BIAS, por su acrónimo en inglés) es la diferencia entre una variable estimada o calculada y el valor real de variable.

$$\text{BIAS} = \frac{\sum_{i=1}^n (e_i - o_i)}{n} \quad \text{Ecuación 4.8}$$

Donde e_i es la estimación de la variable para un píxel determinado, o_i es el valor «real» de la misma y n es el intervalo de tiempo que comprende los datos.

El signo del sesgo indica si existe sobreestimación o subestimación de la variable estimada respecto a la variable real.

En los cálculos realizados en la tesis se han considerado para la variable estimada los datos procedentes de satélite.

4.4.3 Error medio cuadrático (RMSE)

El error medio cuadrático (RMSE, por sus siglas en inglés) es la raíz cuadrada del promedio de los errores al cuadrado, es decir, la diferencia entre el estimador y lo que se estima. Se utiliza el RMSE ya que ambas variables, estimada y real, pueden contener errores. La fórmula que define el RMSE es:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (e_i - o_i)^2} \quad \text{Ecuación 4.9}$$

Donde e_i es la variable estimada para una celda determinada, o_i es la variable real para la misma celda y n es el periodo de tiempo estudiado (mes, estación, año).

4.4.4 Coeficiente de variación

El coeficiente de variación proporciona la variabilidad espacial relativa o proporcional en un número determinado de observaciones. La fórmula que lo define en % es:

$$cv = \frac{\sigma}{\bar{x}} 100 \quad \text{Ecuación 4.10}$$

Donde σ es la desviación estándar y \bar{x} es la media en el periodo analizado. Este parámetro estadístico puede considerarse en nuestro caso, en series anuales, como la variabilidad interanual expresada como el porcentaje de los valores medios (Wilks, 2006).

4.4.5 Modelización lineal entre variables

La regresión lineal permite estudiar cómo se relacionan dos variables prediciendo el valor de una de ellas a partir de la otra cuando la relación se considera lineal. Convencionalmente, el eje de abscisas se utiliza para representar la variable «independiente» (x), o predictiva, y el eje de ordenadas para la variable «dependiente» (y), o pronosticada.

Esencialmente, la regresión lineal busca describir la relación entre dos variables, que muestran gráficamente su dispersión, en una única línea recta (Ecuación 4.11). Para ello se elige la recta que produce el menor error de predicción de la variable dependiente en función de la variable independiente. El criterio más habitual es el de ajuste por mínimos cuadrados que consiste en minimizar la suma de los residuos al cuadrado (Wilks, 2006).

La recta de regresión está caracterizada por la ordenada en el origen y la pendiente (a y b , respectivamente, en la Ecuación 4.11),

$$\hat{y} = a + bx \quad \text{Ecuación 4.11}$$

Donde \hat{y} es la variable pronosticada en función de la variable predictiva, x . El error o residuo (Ecuación 4.12) es la distancia entre la variable dependiente y la variable predicha en la recta de regresión:

$$e_i = y_i - \hat{y}(x_i) \quad \text{Ecuación 4.12}$$

Las expresiones de a y b se obtienen analíticamente con el criterio de mínimos cuadrados, es decir, minimizando las diferencias entre los valores observados y los pronosticados (Ecuación 4.13)

$$\sum_{i=1}^n (e_i)^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - [a + bx_i])^2 \quad \text{Ecuación 4.13}$$

Efectuando la derivada en función de a y b , igualando a 0 y arreglando la expresión se obtiene el valor de la pendiente:

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})} \quad \text{Ecuación 4.14}$$

Y también de la ordenada en el origen:

$$a = \bar{y} - b\bar{x} \quad \text{Ecuación 4.15}$$

La pendiente (Ecuación 4.14) muestra la relación entre las dos variables; el signo indica si la relación es positiva o negativa, y se interpreta como el incremento de la variable dependiente por cada incremento en una unidad de la variable independiente; una relación de la misma magnitud producirá pendientes de ± 1 . Ahora bien, la pendiente de la recta de regresión no mide la fuerza de la relación, excepto cuando se estandariza la variable dependiente respecto al mismo periodo de tiempo que la variable independiente, entonces, el valor de la pendiente se transforma en el coeficiente de correlación de Pearson.

Para medir la bondad del ajuste en la regresión lineal y cuantificar el grado de asociación entre las dos variables se utiliza el coeficiente de correlación o coeficiente de correlación lineal de Pearson (Ecuación 4.16).

$$r = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \sigma_y} \quad \text{Ecuación 4.16}$$

Donde σ_{xy} es la covarianza de las dos variables, y σ_x y σ_y la desviación típica de cada una de ellas. Este coeficiente otorga valores comprendidos entre -1 y 1 . El valor 0 indica que no existe ninguna relación entre las variables; los valores negativos muestran correlación negativa entre ellas, cuando una crece la otra decrece; un valor de -1 indica una correlación negativa perfecta, y, de forma análoga, los valores positivos muestran una correlación positiva, ambas variables aumentan; y 1 es la correlación positiva perfecta.

El coeficiente de determinación (r^2) es el cuadrado del coeficiente de correlación y especifica la proporción de la variabilidad de una de las dos variables descrita por la otra. Este coeficiente proporciona valores comprendidos entre 0 y 1 , donde 0 indica que no existe relación lineal entre las variables y 1 indica una perfecta asociación lineal (Murphy, 1995).

Tanto el coeficiente de correlación de Pearson como el de determinación no son robustos, porque no detectan las asociaciones fuertes entre las variables cuando esta relación no es lineal, además, no son resistentes ya que pueden ser muy sensibles a uno o unos pocos valores atípicos (Wilks, 2006).

En resumen, en la regresión lineal se busca la relación entre una variable dependiente (y) y una variable independiente (x); en cambio, con el coeficiente de correlación y determinación se obtiene el grado de asociación entre las dos variables.

El grado de bondad o significación de una correlación se evalúa mediante el *p-value*, o p-valor. Si es inferior a $0,05$ la correlación es significativa al nivel del 95% y si es inferior a $0,01$, al nivel del 99%.

Finalmente, conviene indicar que una correlación significativa entre dos variables no tiene por qué implicar causalidad entre los comportamientos de ellas, de ahí que el experto ha de establecer las relaciones causa-efecto que expliquen esa relación.

4.5 Evaluación de tendencias en las series temporales

Una serie de datos se dice que muestra tendencia si, en promedio, la serie aumenta o disminuye progresivamente. Existen muchos métodos estadísticos para estimar la evolución temporal de una serie climática. La evaluación de los cambios a largo plazo frecuentemente se describe y cuantifica mediante tendencias lineales. Numerosos autores han estudiado las ventajas y desventajas de usar este método (IPCC, 2013; Storch y Zwiers, 1999; Wilks, 2006).

Una de las cuestiones que hay que tener en cuenta en el análisis de series temporales de variables climáticas y de datos obtenidos desde satélites es la no estacionalidad estricta de algunas series; es decir, contienen un cierto grado de estocasticidad. Por este motivo, el cálculo de tendencia lineal tanto paramétrico como no paramétrico será el que de forma más habitual se utilice en este capítulo por su sencillez en la implementación y facilidad en la interpretación de los resultados. La gran mayoría de autores citados en este documento lo utilizan con frecuencia en sus trabajos.

4.5.1 Tendencias interanuales

4.5.1.1 Regresión lineal. Coeficiente de correlación (r) y determinación (r^2)

La regresión lineal, comentada anteriormente, evalúa la relación entre dos variables; ahora bien, si una de ellas es el tiempo, lo que se analiza es la evolución cronológica de la otra variable.

El término independiente de la recta de regresión lineal corresponderá al tiempo, y la variable dependiente, a la variable a analizar, en este caso la precipitación o el índice de vegetación. Por lo tanto, los valores positivos de la pendiente en la recta de regresión indicarán tendencias crecientes, un aumento de la variable a lo largo del tiempo; los valores próximos a cero indicarán un comportamiento constante de la variable, y los valores negativos, una disminución de la variable en el tiempo.

El significado y la obtención de los coeficientes de correlación y determinación es el mismo que se ha comentado en el epígrafe 4.4.5 dedicado a la modelización lineal entre las variables, pero ahora la variable predictiva es el tiempo. Estos coeficientes son adecuados cuando la relación entre las variables es lineal.

4.5.1.2 Estimador de tendencia no paramétrico Theil-Sen y test de significación estadística Mann-Kendall

Como se ha visto anteriormente, tanto el coeficiente de correlación de Pearson (r) como el de determinación (r^2) tienen por objetivo examinar el grado de asociación lineal entre dos variables. Pero si la relación no es lineal, el coeficiente de correlación de Pearson no será un estadístico adecuado para medir el grado de asociación.

Para evaluar la tendencia de la precipitación o vegetación en el tiempo se ha utilizado una técnica no paramétrica propuesta por Theil (1950) y modificada por Sen (1968). El estimador de Theil-Sen, también conocido como estimador de la pendiente, realiza un análisis de cada píxel por separado en función del tiempo. Para ello, calcula las pendientes definidas entre los posibles pares de píxeles; la estimación de la pendiente final es la mediana del conjunto de valores. El número máximo de pendientes calculadas para cada píxel es de $n(n-1)/2$ donde n es el número de datos comprendido en el estudio: años, meses, días (Neeti y Eastman, 2011).

La técnica Theil-Sen es robusta frente a valores atípicos y tiene la capacidad de rechazar los valores atípicos sin afectar la pendiente. El número de valores fuera de rango que este método puede rechazar equivale al 29 % del tamaño de la muestra (Hoaglin et al., 2000).

Para evaluar el grado de significación de la pendiente Theil-Sen se utiliza el coeficiente de correlación de Mann-Kendall (Neeti y Eastman, 2011), también conocido como Tau-Kendall. Este método es análogo al caso de la regresión lineal, donde la pendiente de la recta de regresión se evalúa a través del coeficiente de correlación, r .

En el test de Mann-Kendall (Hirsch y Slack, 1984; Kendall, 1975; Mann, 1945) los datos se ordenan respecto al tiempo donde cada valor se compara con el valor del dato posterior o anterior. El valor inicial del estadístico Mann-Kendall, S , se supone que es cero (no existe tendencia). Si el valor de un dato es mayor respecto a los valores posteriores, S incrementa en 1, y al contrario, si el valor es menor, S disminuirá en 1 su valor. El resultado neto de todos estos incrementos y decrementos proporciona el valor final de S .

El estadístico S de Mann-Kendall se obtiene mediante la ecuación:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{signo}(x_i - x_j) \quad \text{Ecuación 4.17}$$

donde

$$\text{signo}(x_i - x_j) = \begin{cases} 1 & \text{si } x_i - x_j < 0 \\ 0 & \text{si } x_i - x_j = 0 \\ -1 & \text{si } x_i - x_j > 0 \end{cases} \quad \text{Ecuación 4.18}$$

Un valor alto y positivo de S es indicador de una tendencia creciente, y un valor negativo indica una tendencia decreciente en el tiempo.

Si todos los datos analizados aumentaran con el tiempo, $S = n(n-1)/2$, el coeficiente de correlación debería de ser igual a 1. En caso contrario, si todos los datos disminuyeran con respecto al tiempo, el coeficiente sería igual a -1. Por lo tanto, si se divide S por $n(n-1)/2$ dará un valor comprendido entre -1 y 1, que se denomina *coeficiente de correlación Tau-Kendall* (Helsel y Frans, 2006). Este coeficiente (Ecuación 4.19) mide el grado de asociación monotónica entre una variable y el tiempo, y es:

$$\tau = \frac{S}{n(n-1)/2} \quad \text{Ecuación 4.19}$$

Donde n es la cantidad de datos ordenados respecto al tiempo. Sin embargo, es necesario calcular la probabilidad asociada a S y al tamaño de la muestra, n , para cuantificar estadísticamente la importancia de la tendencia.

El nivel de significancia de τ se comprueba comparando S con lo que se esperaría cuando la hipótesis nula es verdadera (H_0 : las variables son independientes, no existe tendencia). El p -valor resume la probabilidad de obtener el valor observado de τ , o uno más extremo, cuando la hipótesis nula es verdadera. Cuando p es pequeño, la probabilidad de que no haya tendencia también es pequeña, y H_0 se rechaza. Los valores críticos se encuentran en la tabla de la distribución normal.

Para observaciones superiores a 10 pares de datos, el coeficiente Tau-Kendall se ha de estandarizar para aproximarlos a una distribución normal. La forma estandarizada del estadístico Z_S viene dada por:

$$\begin{aligned} Z_S &= \frac{S-1}{\sigma_S} & \text{si } S > 0, \\ Z_S &= 0 & \text{si } S = 0, \\ Z_S &= \frac{S+1}{\sigma_S} & \text{si } S < 0 \end{aligned} \quad \text{Ecuación 4.20}$$

donde

$$\sigma_S = \sqrt{(n/18)(n-1)(2n+5)} \quad \text{Ecuación 4.21}$$

La hipótesis nula es rechazada en un nivel de significación de α si $|Z_S| > Z_{crit}$, donde Z_{crit} es el valor de la distribución normal estándar con un nivel de significación de $\alpha/2$ (Lamprey, 2008).

La tendencia es decreciente si Z es negativo y la probabilidad calculada es mayor que el nivel de significación, y es creciente si Z es positivo y la probabilidad calculada es mayor que el nivel de significación. Si la probabilidad calculada es menor que el nivel de significación, no existe tendencia.

4.5.2 Tendencias estacionales

La precipitación y, en consecuencia, la vegetación en el Sahel tienen una fuerte estacionalidad condicionada por el monzón y el consiguiente régimen pluviométrico estacional. La modelización de la misma pretende describir el ciclo estacional dejando a un lado la variabilidad a corto plazo y el posible ruido introducido en la medida de la variable.

Inicialmente, a partir del cálculo de una regresión armónica se obtienen la amplitud y la fase para cada año, y posteriormente, se buscan tendencias en la amplitud y la fase.

4.5.2.1 Modelización de la estacionalidad. Estimación de la amplitud y la fase en movimientos armónicos

Suponemos la serie temporal (y_1, \dots, y_n) con una estacionalidad cíclica de periodo n . Para poder representarla a través de un movimiento armónico hay que introducir las siguientes modificaciones:

- Transformar el valor angular de la función trigonométrica en tiempo (frecuencia).
- Desplazar la función seno y coseno arriba o abajo al nivel medio de los datos.
- Estirar o encoger los valores multiplicando por una constante (amplitud) y .
- Trasladar lateralmente la función armónica con el fin de que coincidan los puntos máximos y mínimos de los datos con los de la función trigonométrica que se representa (fase).

El modelo para representar la serie será:

$$y_t = \bar{y} + C \cos\left(\frac{2\pi t}{n} - \phi\right) + a_t \quad \text{Ecuación 4.22}$$

Donde \bar{y} son los datos promedio, C es la amplitud, ϕ es la fase, t es el tiempo y a_t es un error aleatorio. La función coseno se ha elegido en la modelización de la serie ya que alcanza su valor máximo cuando el ángulo en el que opera es cero (Wilks, 2006).

Si se desarrolla la función coseno como la suma de los dos ángulos, se puede reescribir la Ecuación 4.22 como:

$$y_t = \bar{y} + C \left(\cos\left(\frac{2\pi t}{n}\right) \cos(\phi) \right) + C \left(\sin\left(\frac{2\pi t}{n}\right) \sin(\phi) \right) + a_t \quad \text{Ecuación 4.23}$$

$$y_t = \bar{y} + A \cos\left(\frac{2\pi t}{n}\right) + B \sin\left(\frac{2\pi t}{n}\right) + a_t \quad \text{Ecuación 4.24}$$

dónde:

$$A = C \cos(\phi) \quad \text{y} \quad B = C \sin(\phi) \quad \text{Ecuación 4.25}$$

La Ecuación 4.24 es más simple ya que representa la serie temporal como suma de dos funciones sinusoidales de amplitudes desconocidas, A y B , que se estiman a partir de los datos. El modelo es lineal en los tres parámetros desconocidos, \bar{y} , A y B , y se pueden estimar por una regresión de mínimos cuadrados (Ecuación 4.26).

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n y_t \quad ; \quad A = \frac{2}{n} \sum_{t=1}^n y_t \cos\left(\frac{2\pi t}{n}\right) \quad ; \quad B = \frac{2}{n} \sum_{t=1}^n y_t \sin\left(\frac{2\pi t}{n}\right) \quad \text{Ecuación 4.26}$$

Se obtiene el estimador de la amplitud C mediante:

$$C = \sqrt{A^2 + B^2} \quad \text{Ecuación 4.27}$$

Y para finalizar, la fase es:

$$\phi = \begin{cases} \tan^{-1} \frac{B}{A}, & A > 0 \\ \tan^{-1} \frac{B}{A} \pm \pi, & \text{o } \pm 180^\circ, \quad A < 0 \\ \frac{\pi}{2}, & \text{o } 90^\circ \quad A = 0 \end{cases} \quad \text{Ecuación 4.28}$$

Los residuos del modelo se calculan con la fórmula:

$$a_t = y_t - \left(\bar{y} + A \cos\left(\frac{2\pi t}{n}\right) + B \sin\left(\frac{2\pi t}{n}\right) \right) \quad \text{Ecuación 4.29}$$

La Ecuación 4.24 representa, aproximadamente, la forma que tiene el periodo de lluvia anual o la estacionalidad de la vegetación en el Sahel. La amplitud es la diferencia entre los valores mínimo y máximo durante la estación y expresa el rango de la variable. La fase indica la posición angular del ciclo, el lugar en el tiempo en el que se produce el pico máximo, un mes corresponde a 30° , y las imágenes de la fase tienen valores comprendidos entre 0 y 360° .

4.5.2.2 Análisis de la tendencia estacional. Pendiente Theil-Sen

La evaluación de la tendencia temporal de la amplitud y la fase estacional de todos los años estudiados se ha realizado a través del cálculo de la pendiente Theil-Sen y el test de significación estadística Mann-Kendall explicados en el epígrafe 4.5.1.2. Se ha calculado la pendiente de cada celda en el tiempo y el resultado ha sido una imagen de pendientes para la amplitud y otra para la fase. Con estas imágenes resultado se puede observar cómo la amplitud o la fase de la variable analizada ha variado con el tiempo.

CAPÍTULO 5 Análisis de los datos de precipitación

5.1 Introducción

La precipitación es la variable climática más compleja de analizar estadísticamente y de representar espacialmente. Los mapas de precipitación se obtienen a partir de la precipitación recogida en los pluviómetros ubicados en la zona de estudio, que permite conocer la cantidad exacta de precipitación en cada punto concreto, pero que obliga a interpolar los datos para el resto del territorio. La exactitud de los mapas depende de varios factores, como la densidad de la red de estaciones meteorológicas, la calidad en la medida y el algoritmo utilizado en la interpolación. Actualmente, los mapas de precipitación se complementan con valores estimados de lluvia obtenidos por las imágenes de los satélites meteorológicos o mediante radares pluviométricos terrestres.

En el Sahel, como se ha comentado en capítulos anteriores, la red de estaciones meteorológicas es escasa y algunas de ellas han dejado de ofrecer información de forma continuada durante las dos últimas décadas. Las estimaciones de precipitación por satélite han venido a suplir, en cierta manera, la deficiencia de las medidas en una región donde la lluvia se comporta de manera irregular tanto espacial como temporalmente. Y no es sólo porque la precipitación se produzca durante cuatro o cinco meses al año, sino porque las lluvias se pueden concentrar en unos pocos días de forma muy intensa y muy localizadas espacialmente (Tschakert et al., 2010).

Las técnicas para estimar la precipitación por satélite consisten, principalmente, en observaciones en las bandas del espectro electromagnético correspondientes al infrarrojo y al microondas. Sin embargo, la medida indirecta de la precipitación contiene un error aleatorio y un sesgo no despreciable. Para intentar minimizar estos errores, la mayoría de algoritmos que proporcionan estimaciones de precipitación combinan las observaciones de varios satélites y en diferentes bandas espectrales con valores de la red de estaciones meteorológicas terrestres.

En las últimas décadas se ha desarrollado una gran variedad de algoritmos que proporcionan estimaciones de precipitación, y con ellos se han realizado varios trabajos de comparación

tanto de ámbito global como sobre el Sahel en particular. Algunos de los estudios recientes sobre el Sahel (Jobard et al., 2011; Nicholson, 2013; Roca et al., 2010) han demostrado la existencia de una buena relación entre las estimaciones de precipitación, tanto mensuales como decenales, y datos de estaciones meteorológicas. En estos trabajos se ha observado que la distribución espacial y temporal en la época de lluvias de los algoritmos analizados era muy similar pero presentaba diferencias en la cantidad de lluvia registrada; esta desviación de la cantidad de precipitación podía afectar las simulaciones sobre la dinámica de la vegetación.

Uno de los objetivos de la tesis es analizar la variabilidad pluviométrica en el Sahel entre 1983 y 2012; por ello, se ha considerado necesario efectuar una evaluación cuantitativa de la estimación de la precipitación medida por satélite, para poder entender cómo los errores y la incertidumbres de la medida se pueden propagar en el análisis de la dinámica de la precipitación en las últimas décadas. Se analizan tres series temporales de precipitación con más de 30 años de datos con características dispares, que serán las que más adelante se utilizarán en el capítulo 7: «Comparación del régimen de lluvias y la dinámica de la vegetación».

- *Global Precipitation Climatology Centre* (GPCC), elaborado, exclusivamente, a partir de datos de estaciones meteorológicas terrestres.
- *Africa Rainfall Climatology* versión 2 (ARC2), datos procedentes de medidas de satélites calibradas con estaciones meteorológicas terrestres.
- *Tropical Applications of Meteorology using SATellite data and ground-based observations* (TAMSAT), elaborado, exclusivamente, a partir de datos de satélite calibrados en función de la situación de la celda final.

La serie GPCC se utiliza como validación de las estimaciones de precipitación por satélite y se considera «verdad terreno», ya que sus datos de origen proceden de estaciones meteorológicas. Estos datos también han sido utilizados en las proyecciones realizadas en los informes de evaluación (AR, por sus siglas en inglés) del IPCC (IPCC, 2013).

En las últimas décadas, los avances tecnológicos han permitido poner en órbita satélites meteorológicos con mejores capacidades de observación y se han diseñado algoritmos que han permitido la integración de diferentes fuentes de información, con lo cual se ha conseguido que los resultados sean más cercanos a la realidad, aunque, como es lógico, únicamente se dispone de poco más de una década de datos.

Por esta razón, se quiere comparar algunos de los últimos algoritmos que aportan mejor calidad con aquellos que tienen una serie temporal más larga. Los algoritmos seleccionados para el análisis de la calidad y descritos en el capítulo 3, «Fuentes de datos», son los siguientes:

- *Africa Rainfall Estimates* versión 2 (RFE2)
- *Tropical Rainfall Measuring Mission* 3B42 (TRMM 3B42)
- *Global Precipitation Climatology Project* 1dd (GPCP-1dd)

El objetivo es dar respuesta a las siguientes preguntas:

- ¿Existe una buena relación entre la precipitación medida por las estaciones meteorológicas y los datos GPCC? ¿Se pueden utilizar GPCC como datos de validación?
- ¿Se puede confiar en la calidad de las series GPCC, ARC2 y TAMSAT entre 1983 y 2012?

- Los nuevos algoritmos, ¿pueden ser una apuesta de futuro en el estudio de la variabilidad climática?
- ¿Se ha recuperado la precipitación en el Sahel durante las últimas décadas?

Para poder dar respuesta a estas cuestiones se seguirá un conjunto de pasos. El primero, verificar la calidad de los datos de validación; a continuación, observar el comportamiento de las estimaciones de precipitación más recientes y, finalmente, analizar los tres conjuntos que aportan datos de precipitación desde hace más de 30 años.

5.2 Verificación de los datos de validación

Antes de cuantificar las similitudes o diferencias entre las estimaciones de precipitación y los datos de validación, es importante verificar la bondad de los datos de validación.

Los datos de validación, la «verdad terreno», utilizados en la tesis corresponden a los proporcionados por el GPCC en formato ráster con una resolución espacial de 0,5° y mensual de un mes. Estos datos son la interpolación de la precipitación mensual proporcionada por la red de estaciones meteorológicas terrestre de la OMM.

El análisis de validación se ha dividido en tres apartados. El primero comprende la evaluación de datos procedentes de estaciones meteorológicas con los datos GPCC y CRU. El segundo incluye la comparativa espacial de GPCC y el índice SRI. Y en el tercero se han comparado los datos GPCC y CRU.

Aunque los productos de precipitación procedentes de GPCC no son estrictamente la verdad terreno, se puede decir que representan la mejor aproximación disponible. En su elaboración es muy importante el número de estaciones meteorológicas que han proporcionado registros y es conocido que uno de los principales problemas en el Sahel es la escasez de dichas estaciones, a lo cual se añaden problemas de funcionamiento que han provocado que algunas de ellas dejen de proporcionar datos durante prolongados periodos de tiempo.

El número de estaciones que han participado en la elaboración del GPCC en el Sahel ha disminuido drásticamente desde finales de la década de 1990 hasta la actualidad (Figura 5.1 y Figura 5.2), y, como resultado, el número de celdas que no contienen ninguna estación meteorológica ha aumentado sensiblemente; por ejemplo, el mes de agosto de 2010 para datos GPCC el 93,3 % de las celdas no contenía ninguna estación y para datos CRU el tanto por ciento era de 95,4.

Los conjuntos de datos GPCC y CRU se diferencian sólo en los procedimientos y técnicas de interpolación y se ha de esperar una coincidencia casi perfecta entre ambos, ya que GPCC incluso incluye datos CRU (Tapiador et al., 2011).

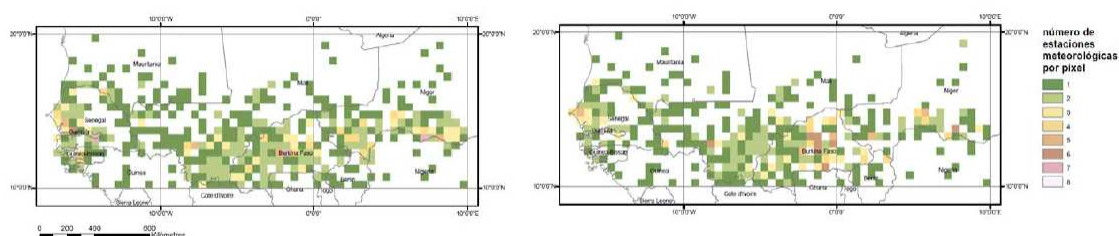


Figura 5.1. Número de estaciones meteorológicas por píxel en el mes de agosto de 1983 para los datos GPCC (imagen izquierda) y CRU (imagen derecha).

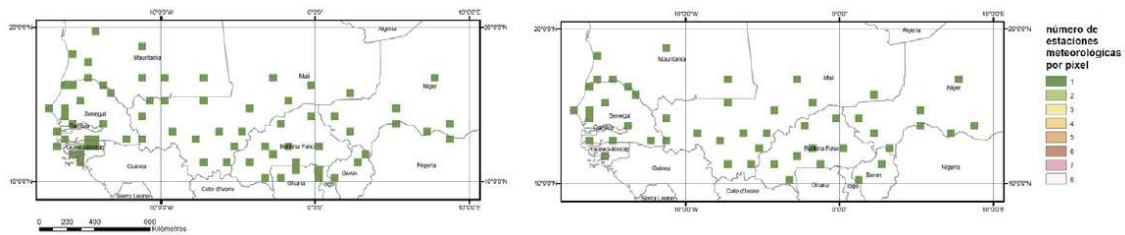


Figura 5.2. Número de estaciones meteorológicas por píxel en el mes de agosto de 2010 para los datos GPCC (imagen izquierda) y CRU (imagen derecha).

5.2.1 Comparación de la precipitación recogida por las estaciones meteorológicas, GPCC y CRU

El primer análisis parece el más lógico, consiste en comparar datos que proceden directamente de las estaciones meteorológicas terrestres situadas en la zona y que pertenecen a la OMM y a otras fuentes con los valores de las celdas en las que están localizadas dichas estaciones meteorológicas en las series de datos GPCC y CRU. Hay que tener en cuenta la superficie de la celda en la que se encuentra cada estación meteorológica, que es de aproximadamente 3.080 km^2 .

Los datos de las estaciones meteorológicas se han obtenido de la base de datos World Monthly Surface Station Climatology, ds570.0 ("CISL RDA: World Monthly Surface Station Climatology," 1981), y, por lo tanto, son valores con una distribución espacial puntual.

Se han seleccionado siete estaciones meteorológicas existentes en la zona y pertenecientes a la OMM. Los criterios de selección han sido: situación geográfica, participación en la elaboración del índice SRI y el hecho de haber proporcionado valores de forma más o menos continuada a lo largo de los 30 años analizados. Las estaciones seleccionadas son las que siguen: Diourbel (Senegal), Kiffa (Mauritania), Kita (Malí), Ouahigouya (Burkina Faso), Natitingou (Benín) y Maradi y Tahoua (Níger) (Figura 5.3). Según los datos de la FAO (FAOSTAT, 2014), todos los países donde están situadas han doblado su población entre 1983 y 2012 o incluso la han triplicado, como Mauritania.

Se ha comparado la precipitación recogida en cada una de ellas con los valores de la celda en la que se halla para los datos de interpolación GPCC y CRU. Con los valores de cada una de las estaciones se ha calculado la media, la mediana, la desviación estándar, el coeficiente de variación, el año de máxima y mínima precipitación y se les ha aplicado dos test de homogeneización a las series (test de Von Neumann y Thom). Con respecto a los valores de la estación meteorológica se han comparado las varianzas y se ha calculado el coeficiente de determinación y correlación. También se ha calculado la tendencia temporal de cada uno de los datos.

Uno de los problemas, ya comentado anteriormente, es la falta de continuidad de los valores mensuales de las estaciones meteorológicas en la zona, principalmente entre los años 2000 y 2007. Para rellenar los huecos de los valores mensuales que faltan se ha optado por calcular el promedio entre los valores que pertenecen al mismo mes siempre y cuando ese mes pertenezca a la época húmeda (mayo, junio, julio, agosto, septiembre y octubre). Si el mes al que le falta un valor corresponde a la época seca, se deja sin datos.

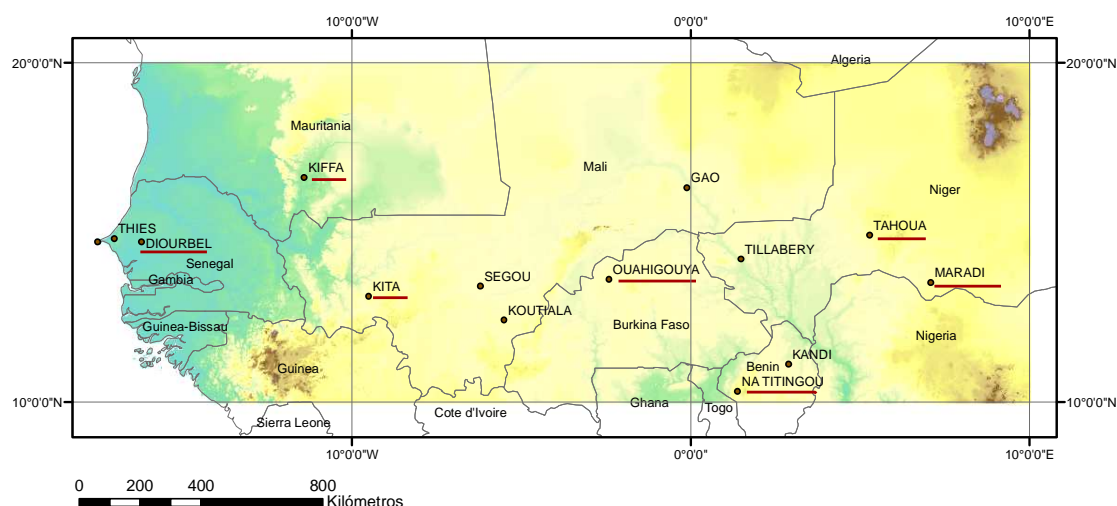


Figura 5.3. Estaciones meteorológicas de la red OMM que han participado en la elaboración del Sahel Rainfall Index. En rojo, las estaciones que han sido analizadas.

5.2.1.1 Diourbel, Senegal

La estación meteorológica de Diourbel, en Senegal (número 616660 de la OMM), está situada en una zona suburbana de la ciudad de la que toma el nombre ($14,65^{\circ}$ N; $16,23^{\circ}$ O), situada a una altitud de 9 m y con una población aproximada de 50.000 habitantes. Los campos de cultivos adyacentes son los tradicionales para un clima bastante cálido y seco. Se tienen datos de precipitación desde 1920 hasta la actualidad con un promedio anual de 632 mm (Figura 5.4). El año en que se recogió el valor más elevado fue 1950 (1154 mm), con precipitaciones excepcionales durante los meses de agosto y septiembre, y el registro inferior corresponde a 1983 (285 mm), un año en que prácticamente no llovió durante el mes de julio (3 mm) y durante los restantes meses la precipitación se redujo a la mitad de lo habitual. La precipitación disminuyó drásticamente en las décadas de 1970 y 1980, y se recuperó en la década de 1990, aunque no volvió a los valores de las décadas de 1950 y 1960.

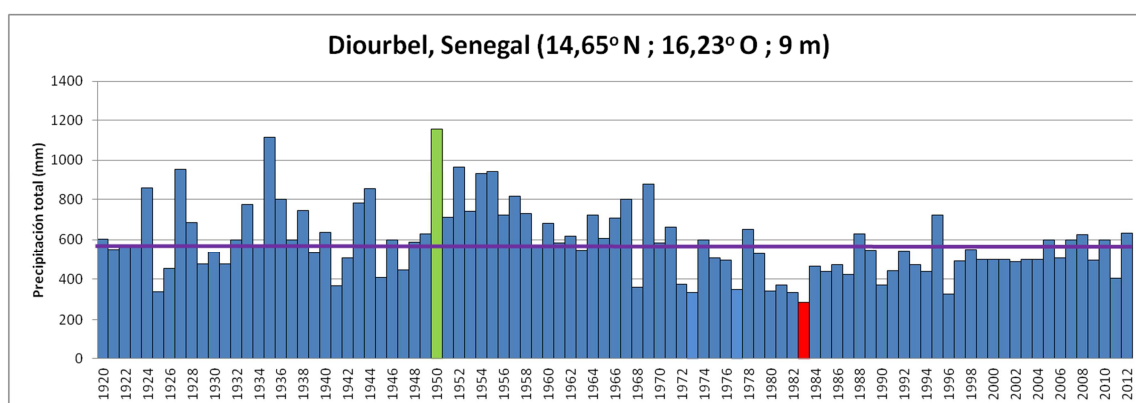


Figura 5.4. Registros de precipitación anual de la estación meteorológica de Diourbel, Senegal, de 1920 a 2012.

Si se analizan los datos de la estación meteorológica con los procedentes de GPCC y CRU en el periodo comprendido entre 1983 y 2012 (Figura 5.5), se observa un aumento de la precipitación desde el inicio de la serie, con una pendiente de 4,4 mm/año para los datos de Est.Met. y 7,0 mm/año para GPCC y CRU, este incremento es significativo con un nivel de confianza del 99% para el test no paramétrico de Mann-Kendall. La coincidencia anual de los tres conjuntos de datos es buena en el inicio de la serie pero se va perdiendo con el paso del tiempo. Una de las causas es la ausencia de numerosos registros mensuales en la Est.Met

para los meses de la época húmeda entre 1998 y 2003, que se han suplido con valores promedio de los 30 años.

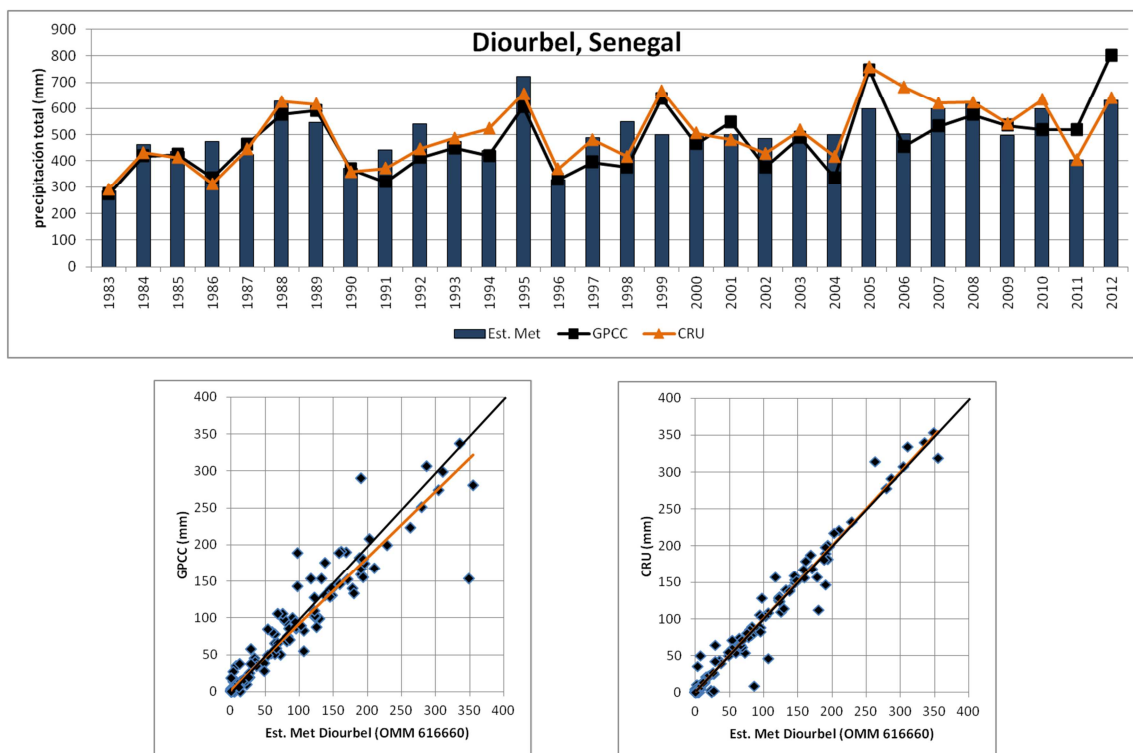


Figura 5.5. Precipitación anual en la estación de Diourbel, Senegal, para los valores de la Est.Met, GPCC y CRU (arriba). Gráficos de dispersión entre la estación meteorológica y GPCC (inferior izquierda), y la estación meteorológica y CRU (inferior derecha).

Los gráficos de dispersión se han realizado a partir de valores mensuales de precipitación y no se han tenido en cuenta aquellos valores que no han sido reportados por la estación meteorológica. Se observa una buena coincidencia entre los conjuntos de pares, aunque el conjunto CRU y los datos de la estación meteorológica ofrecen mejor resultado (Figura 5.5).

Tabla 5.1. Cuadro resumen con medidas estadística básicas de la precipitación en Diourbel, Senegal, para el periodo comprendido entre 1983 y 2012.

Diourbel, Senegal	Est.Met	GPCC	CRU
Media (mm)	502.0	476.2	505.6
Mediana (mm)	499.5	458.8	484.5
Desv. estándar (mm)	94.0	124.7	121.8
Varianzas similares		Sí	Sí
Coef. variación (%)	18.7	26.2	24.1
Año max precip	1995	2012	2005
Año min precip	1983	1983	1983
r respecto Est.Met		0.69	0.77
r^2 respecto Est.Met		0.48	0.59
Homogénea:			
Von Neuman	Sí	NO	NO
Thom	Sí	Sí	Sí

Los valores procedentes de la Est.Met y CRU, de promedio, dan la misma precipitación, y los de GPCC son un poco inferiores (Tabla 5.1). Los tres conjuntos de datos son homogéneos según el test de Thom, pero no para el de Von Neuman. La desviación estándar tiene un valor elevado a causa de la gran variabilidad interanual de la serie. Existe coincidencia en el

año con menos precipitación, 1983, pero no en el de mayor precipitación, que es diferente para cada conjunto.

5.2.1.2 Kiffa, Mauritania

La estación meteorológica de Kiffa, en Mauritania ($16,63^{\circ}$ N; $11,4^{\circ}$ O; 115 m), a la que le corresponde el número de la OMM 614980, es de todas las estaciones seleccionadas la que está situada más al norte. De esta estación no se tienen registros completos anuales que lleguen hasta 2012. Desde 1996 la estación ha funcionado de forma discontinua, y, aunque ha aportado algún registro mensual puntual, estos han sido insuficientes para poder establecer la cantidad anual de precipitación observada.

Esta estación está ubicada en el aeropuerto de Kiffa, a 2 km de la ciudad de la que toma el nombre, de 11.000 habitantes. Los cultivos adyacentes a la estación son pastos y arbustos.

La precipitación anual promedio entre 1922 y 1996 es de 307 mm. Se observa cómo a partir del inicio de la década de 1970 hay un declive pronunciado de la precipitación, un ciclo que se había reproducido anteriormente en la década de 1940, aunque no se alargó tanto tiempo. El año de máxima precipitación fue 1933 (662 mm), con un mes de agosto muy lluvioso, y el año en el que se registró menos precipitación fue 1982 (101 mm).

De esta estación no se realizará un análisis detallado entre 1983 y 2012 por la ausencia de datos a partir de 1997.

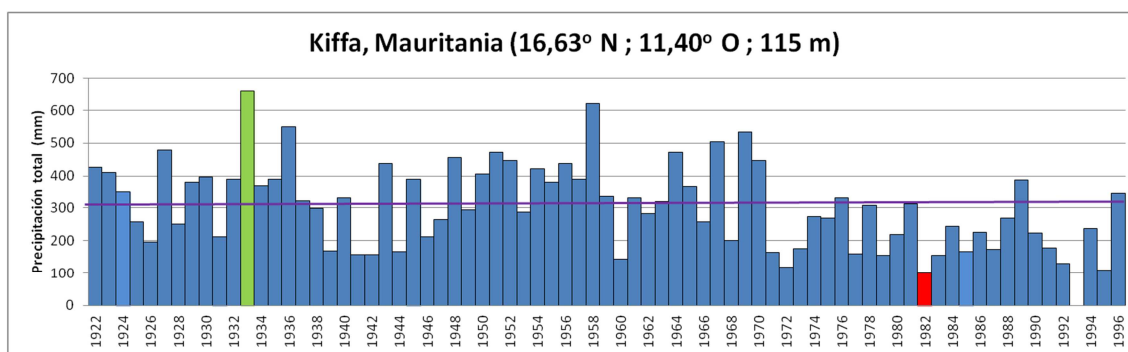


Figura 5.6. Registros de precipitación anual de la estación meteorológica de Kiffa, Mauritania, de 1922 a 1996.

5.2.1.3 Kita, Malí

La estación meteorológica de Kita, Malí, estación 612700 de la OMM, ha proporcionado registros desde 1931 hasta la actualidad, y, como en los anteriores casos, faltan algunos registros mensuales a partir del año 1992, lo cual hace imposible calcular la precipitación anual de algunos años, así que se ha optado por prescindir de estos. Los años eliminados son: 1992, 1993, 2003, 2005, 2006, 2007 y 2011.

La estación de Kita ($13,07^{\circ}$ N; $9,47^{\circ}$ O) está situada en una zona de colinas suaves, con una altitud de 334 m. Los cultivos existentes alrededor de la estación son los que corresponden a un clima cálido y húmedo.

La precipitación anual promedio en el intervalo comprendido entre 1931 y 2012 es de 890 mm; el año en que se registró el valor máximo fue 1936 (1620 mm) y el mínimo, en 1987 (661,5 mm). En la serie histórica se observa una disminución de la precipitación a partir de finales de la década de 1950, que se recupera ligeramente a mitad de la década de 1990, pero que a continuación vuelve a decaer.

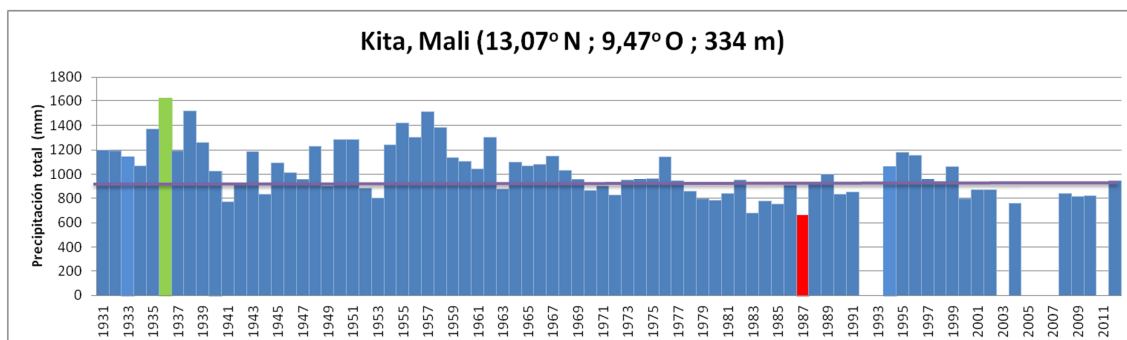


Figura 5.7. Registro anual de la precipitación en la estación de Kita, Malí.

Comparando los datos registrados en el periodo de tiempo que abarca la tesis, se observa cómo los tres conjuntos de datos se comportan de forma muy parecida puesto que recogen las mismas variaciones de precipitación entre los años analizados hasta el año 2004 (Figura 5.8); a partir de este momento los datos dejan de parecerse. Los valores de la serie del CRU son superiores respecto a los GPCC en unos 70 mm/año de promedio y en relación a la estación meteorológica, unos 100 mm/año. La tendencia temporal entre los datos GPCC y CRU es muy similar exceptuando la sobrestimación constante de los valores CRU.

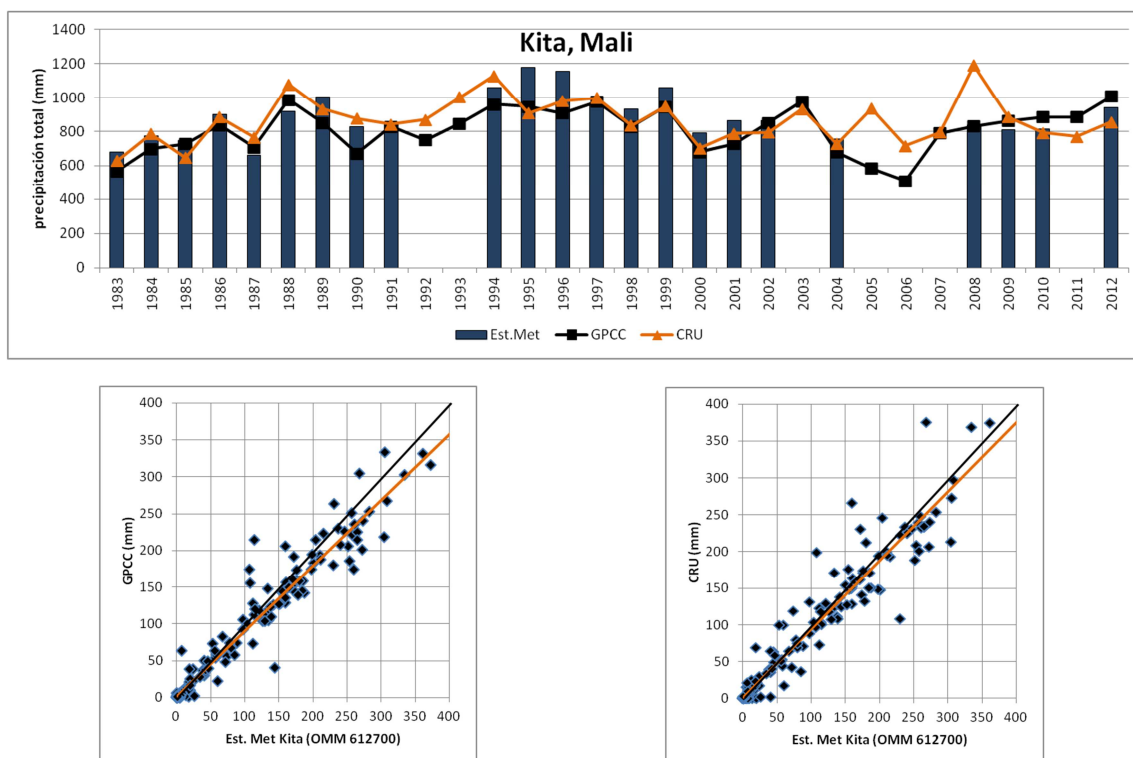


Figura 5.8. Precipitación anual en la estación de Kita, Malí, para los valores de la Est. Met, GPCC y CRU (arriba). Gráficos de dispersión entre la estación meteorológica y GPCC (inferior izquierda), y la estación meteorológica y CRU (inferior derecha)

Los gráficos de dispersión calculados a partir de valores mensuales, incluyendo únicamente los meses en que la estación meteorológica cuenta con registros, tienen una buena similitud, que es mejor entre los datos CRU y la estación meteorológica (Figura 5.8).

5.2.1.4 Ouahigouya, Burkina Faso

La estación meteorológica de Ouahigouya en Burkina Faso, 655020 de la OMM, está emplazada en la ciudad de Ouahigouya (13,6° N; 2,4° O). El área donde se sitúa es relativamente llana, con una altitud de 329 m.

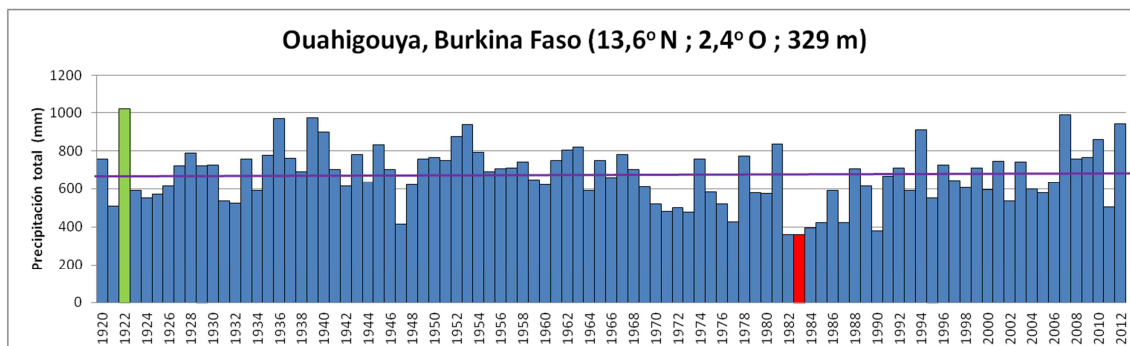


Figura 5.9. Precipitación anual para la estación de Ouahigouya, Burkina Faso.

La precipitación promedio anual entre 1920 y 2012 es de 672 mm; el año en el que se recogió más precipitación fue 1922 (1020 mm) y el que menos, 1983 (358,2 mm). La serie temporal muestra cómo la precipitación empezó a disminuir de forma continuada en la década de 1970, y es en 1983 cuando se produce el mínimo histórico. A partir de 1990 se observa un aumento de la precipitación y se registran valores parecidos o superiores a los del inicio del periodo de sequía (Figura 5.9).

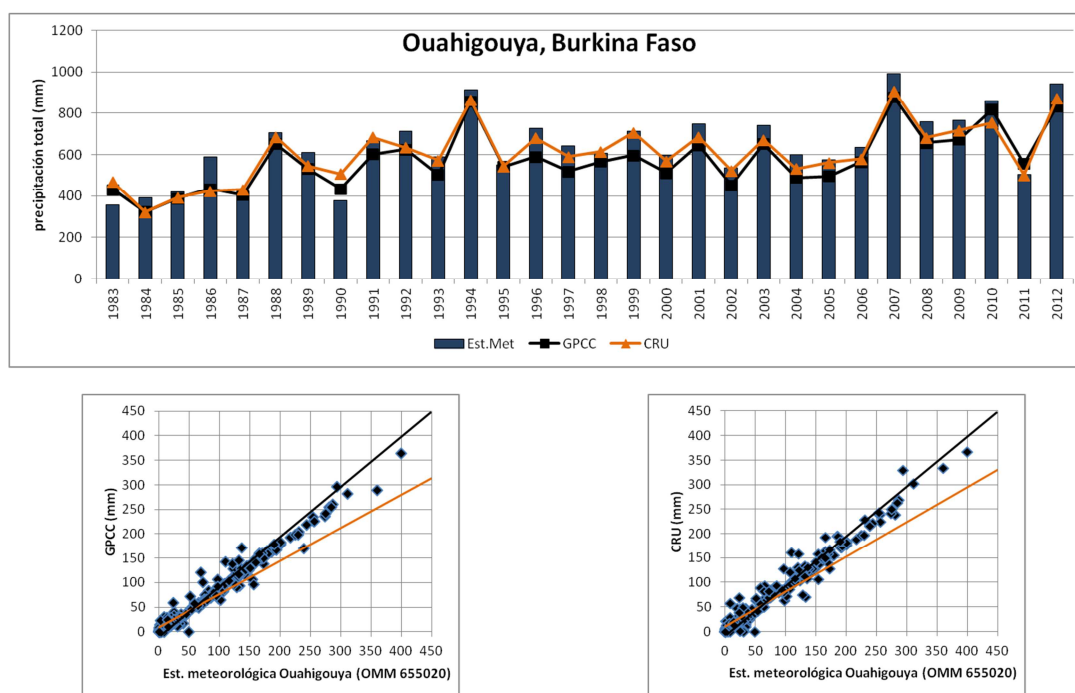


Figura 5.10. Precipitación anual de los valores de la estación meteorológica, GPCC y CRU de Ouahigouya, Burkina Faso (arriba). Gráficos de dispersión entre la estación meteorológica y GPCC (inferior izquierda), y la estación meteorológica y CRU (inferior derecha)

La estación de Ouahigouya es una de las estaciones meteorológicas con más continuidad para facilitar la precipitación total mensual, ya que ha registrado todos los valores de los meses de junio a septiembre de los 30 años que abarca el estudio.

Los tres conjuntos de datos reflejan perfectamente los años más húmedos respecto a los más secos, los datos procedentes de la estación meteorológica muestran más precipitación que los GPCC y CRU.

Se observa una tendencia creciente de la precipitación para los tres conjuntos de datos (Figura 5.10), además de una buena semejanza entre ellos a nivel anual. Esta tendencia es significativa con un nivel de confianza del 99% en el test Mann-Kendall. En los gráficos de dispersión, con datos mensuales, se observa que los datos GPCC están sobrestimados respecto a GPCC y CRU.

Tabla 5.2. Cuadro resumen con medidas estadística básicas de la precipitación en Ouahigouya, Burkina Faso, para el periodo de 1983 a 2012.

Ouahigouya, Burkina Faso	Est.Met	GPCC	CRU
Media (mm)	642.3	575.0	607.9
Mediana (mm)	623.4	561.1	585.1
Desv. estándar (mm)	162.9	139.5	139.5
Varianzas similares		Sí	Sí
Coef. variación (%)	25.4	24.3	22.9
Año max precip	2007	2007	2007
Año min precip	1983	1984	1984
<i>r</i> respecto Est.Met		0.95	0.94
<i>r</i> ² respecto Est.Met		0.90	0.88
Homogénea:			
Von Neuman	Sí	NO	NO
Thom	Sí	Sí	Sí

Las tres series son homogéneas según el test de homogeneización de Thom, aunque los datos CPCC y CRU no lo son según el test Von Neuman. Los demás parámetros estadísticos calculados —comparación de medias, coeficiente de correlación y determinación respecto los valores de la estación meteorológica— muestran un buen acuerdo entre las tres series.

5.2.1.5 Natitingou, Benín

La estación meteorológica de Natitingou, en Benín (10,32° N; 1,38° E), es la que se encuentra situada más al sur de todas las existentes en el área de estudio. Natitingou se halla en una zona rural con una topografía de colinas suaves y con una altitud promedio de 460 metros, los cultivos cercanos a la estación meteorológica son los tradicionales de zonas cálidas.

La estación de Natitingou, número 653190 de la OMM, es una de las que se tienen más datos de forma continuada para los 30 años del estudio.

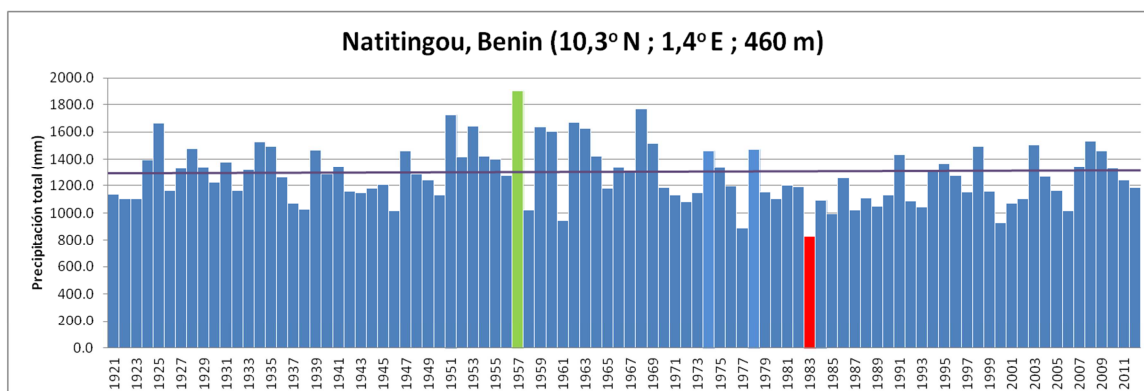


Figura 5.11. Valores anuales de precipitación (mm) de la estación meteorológica Natitingou, Benín, de 1921 a 2012.

Se observa una tendencia creciente en el tiempo de los datos de precipitación entre 1983 y 2012 (Figura 5.12), corroborada por el test de Mann-Kendall con un nivel de confianza del 99%. La precipitación anual de todos los datos es muy parecida.

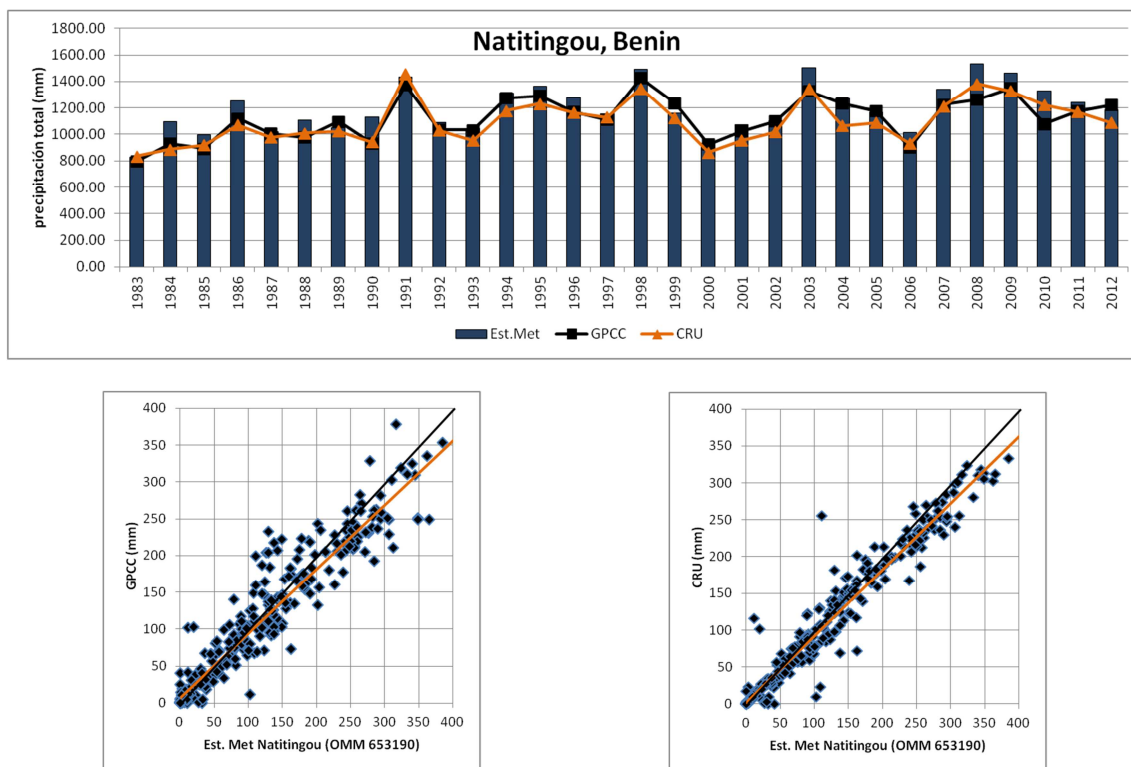


Figura 5.12. Precipitación anual en la estación de Natitingou, Benín, para los valores de la Est. Met, GPCC y CRU (arriba). Gráficos de dispersión entre la estación meteorológica y GPCC (inferior izquierda), y la estación meteorológica y CRU (inferior derecha).

En los gráficos de dispersión se observa que los datos CRU comparados con los GPCC están más cercanos a la bisectriz (Figura 5.12). Hay que destacar que los parámetros estadísticos básicos de comparación entre las series (Tabla 5.3) muestran una gran semejanza entre ellos.

Tabla 5.3. Cuadro resumen con medidas estadística básicas de la precipitación en Natitingou, Benín.

Natitingou, Benín	Est. Met	GPCC	CRU
Media (mm)	1198.5	1123.8	1098.2
Mediana (mm)	1162.5	1112.2	1071.2
Desv. estándar (mm)	179.9	161.9	164.6
Varianzas similares		SÍ	SÍ
Coef. variación (%)	15.0	14.4	15.0
Año max precip	2008	1998	1991
Año min precip	1983	1983	1983
r respecto Est. Met		0.89	0.95
r^2 respecto Est. Met		0.79	0.89
Homogénea:			
Von Neumann	NO	NO	NO
Thom	SÍ	SÍ	SÍ

5.2.1.6 Tahoua, Níger

La estación meteorológica de Tahoua, Níger (14,9° N; 5,25° E), está situada en una zona relativamente llana, con una altitud de 386 m, donde la vegetación dominante, en un radio de

unos 50 km, es sabana tropical. Tahoua es una población relativamente pequeña de aproximadamente 31.000 habitantes.

Los datos de la estación meteorológica están incompletos y algunos de los que faltan se concentran en los meses de la época húmeda, principalmente entre los años 2001 y 2007. Para poder completar la precipitación anual acumulada se han sustituido los valores inexistentes por el promedio del mes en cuestión.

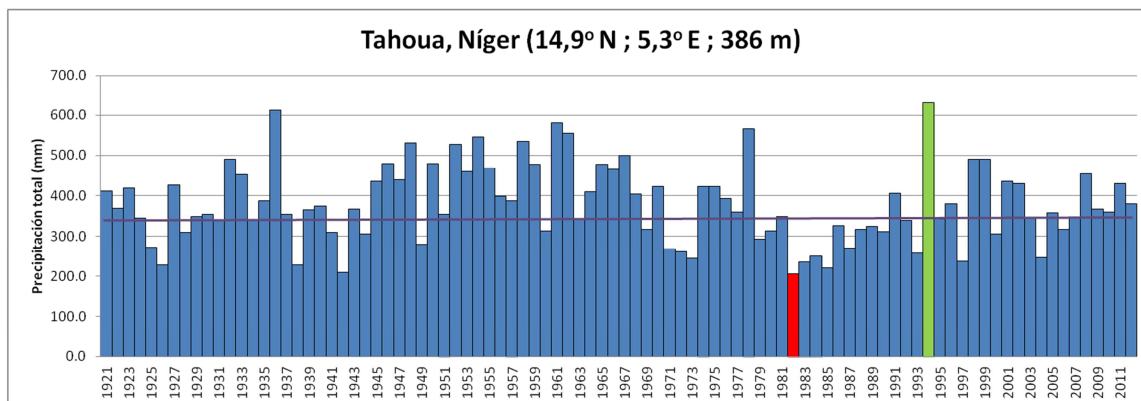


Figura 5.13. Valores anuales de precipitación (mm) de la estación meteorológica Tahoua, Níger, de 1921 a 2012.

La precipitación promedio de la serie histórica es de 350 mm/año; el año de máxima precipitación fue 1994 (631 mm), con una precipitación que dobló la precipitación promedio, mientras que el año en que se registró la mínima precipitación fue 1982 (207 mm).

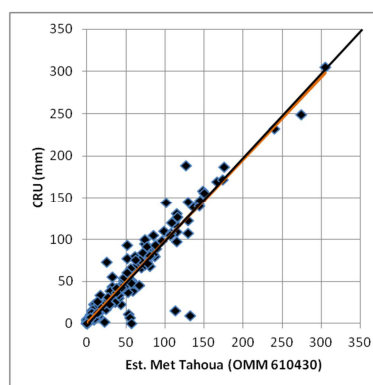
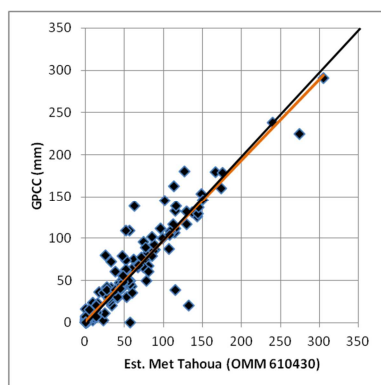
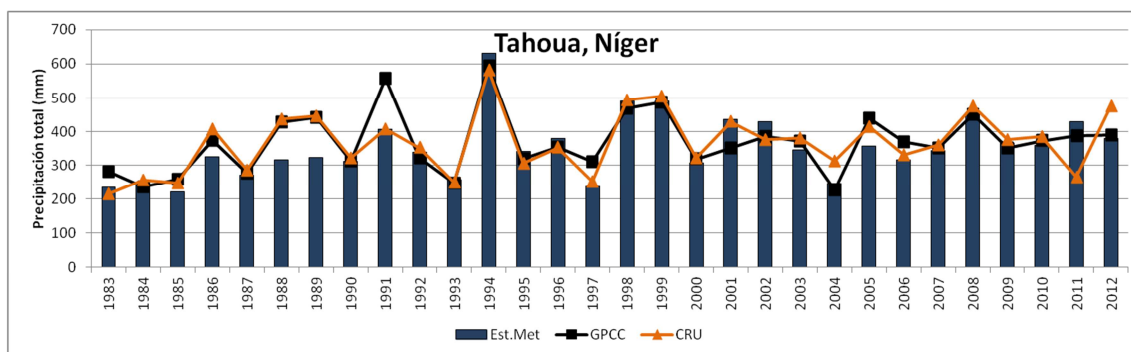


Figura 5.14. Precipitación anual en la estación de Tahoua, Níger, para los valores de la Est. Met, GPCC y CRU (arriba). Gráficos de dispersión entre la estación meteorológica y GPCC (inferior izquierda), y la estación meteorológica y CRU (inferior derecha).

En el análisis de tendencia (Figura 5.14), los datos son bastante coincidentes y se observa que aunque existen fluctuaciones de años más húmedos que otros, la tendencia general en los

últimos 30 años es creciente según el test de Mann-Kendall con un nivel de confianza estadística del 95%. Los valores de precipitación anual son muy parecidos, especialmente entre los valores GPCC y CRU; el año en el que se produce una mayor discrepancia es 1991, y el de mayor aproximación, 1996.

En el análisis más detallado de los tres conjuntos de datos, se observa que coinciden en el año de menor precipitación, aunque no en el de mayor precipitación (Tabla 5.4). La media y la mediana son muy parecidas, especialmente para los datos GPCC y CRU. Las medias son idénticas y los coeficientes de correlación y determinación respecto Est.Met son prácticamente los mismos. Las tres series son homogéneas según los test de Von Neuman y Thom.

Tabla 5.4. Comparación entre las series de datos Est.Met, GPCC y CRU para la estación de Tahoua (Níger).

Tahoua, Níger	Est.Met	GPCC	CRU
Media (mm)	353.2	367.7	367.4
Mediana (mm)	342.9	360.9	368.2
Desv. estándar (mm)	90.9	88.8	89.7
Varianzas similares		SÍ	SÍ
Coef. variación (%)	25.7	24.1	24.4
Año max precip	1994	1994	1994
Año min precip	1985	2004	1983
r respecto Est.Met		0.83	0.82
r2 respecto Est.Met		0.69	0.67
Homogénea:			
Von Neuman	SÍ	SÍ	SÍ
Thom	SÍ	NO	SÍ

5.2.1.7 Maradi, Níger

La estación meteorológica de Maradi está situada en el aeropuerto de la misma ciudad (13,47° N; 7,08° E). Maradi es una pequeña ciudad con una población de aproximadamente 46.000 habitantes con una topografía relativamente llana y una altitud de 368 metros. Los cultivos que se pueden encontrar cerca de la estación son los normales de un clima tropical seco.

Los datos de la estación meteorológica de Maradi, número 610800 de la OMM, muestran algunos registros mensuales vacíos que corresponden a la época de lluvias, razón por la cual se ha optado por eliminar esos años. En concreto se han eliminado los años 1998 y 2006.

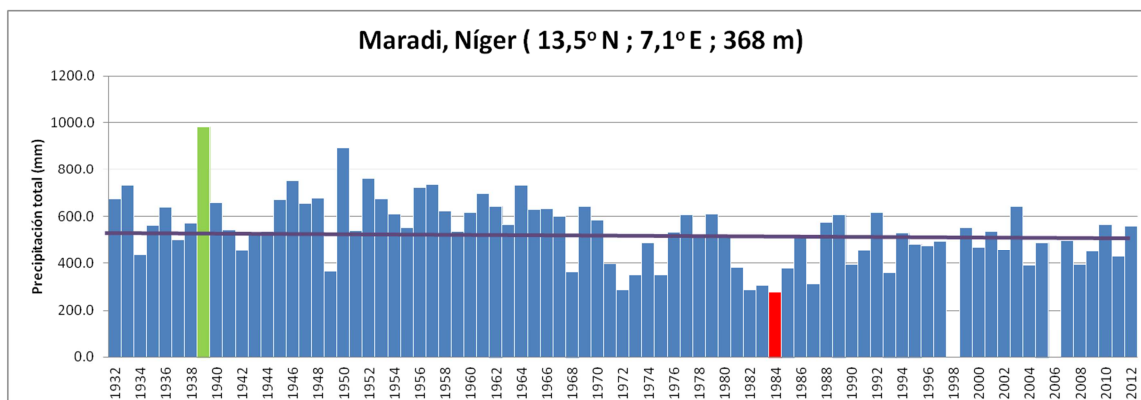


Figura 5.15. Valores anuales de precipitación (mm) de la estación meteorológica Maradi, Níger, de 1932 a 2012.

Se tienen datos de la estación meteorológica de Maradi desde 1932 hasta la actualidad (Figura 5.15). El valor promedio de la precipitación en este intervalo es de 540 mm/año; el año en que

se registró más precipitación fue 1939 (981 mm) y el que menos, 1984 (278 mm). En el registro histórico se observa una disminución de la precipitación a partir de la década de 1970, con años de sequía severa, y aunque la precipitación se ha recuperado no lo ha hecho a los niveles de la primera mitad del siglo pasado.

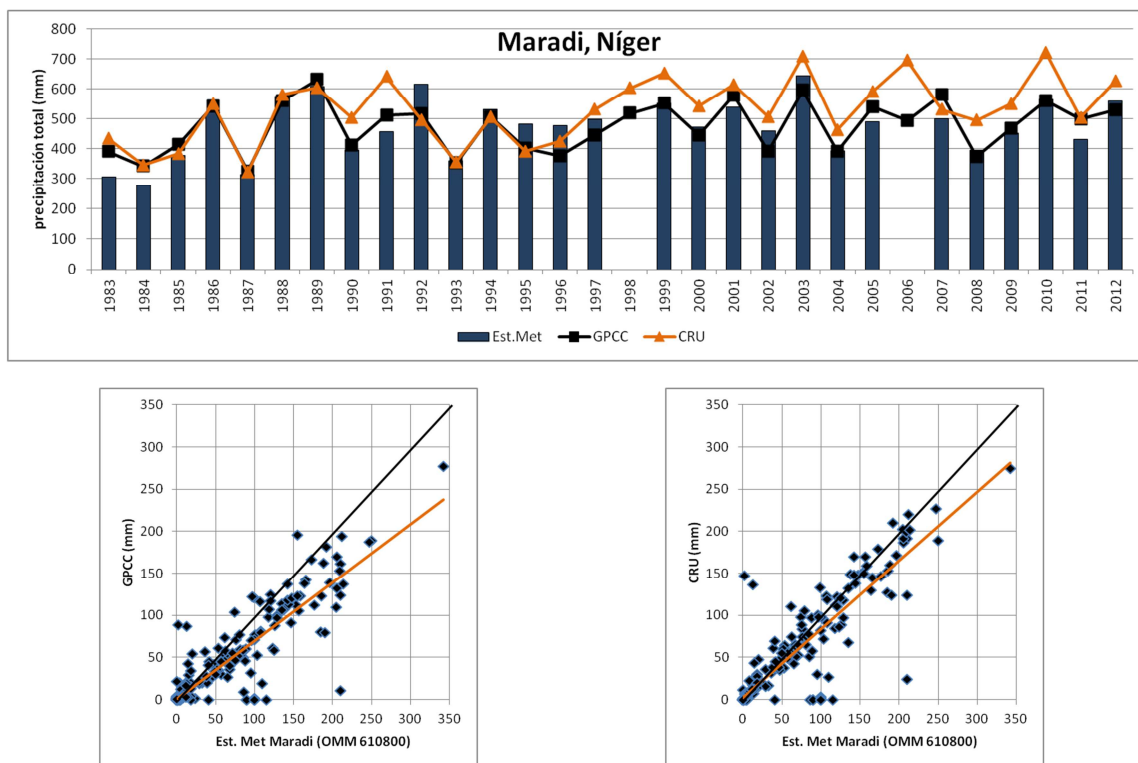


Figura 5.16. Precipitación anual en la estación de Maradi, Níger, para los valores de la Est. Met, GPCC y CRU (arriba). Gráficos de dispersión entre la estación meteorológica y GPCC (inferior izquierda), y la estación meteorológica y CRU (inferior derecha).

Los datos CRU en los años más húmedos recogen más precipitación que los valores procedentes de la Est. Met y GPCC (Figura 5.16). Los tres conjuntos de datos no coinciden en el año de máxima precipitación y el año de mínima precipitación coincide en dos de ellos (Tabla 5.5). Los coeficientes de correlación y determinación respecto a los valores Est. Met son elevados y positivos y algo mejores para GPCC.

Tabla 5.5. Comparación entre las series de datos Est. Met, GPCC y CRU para la estación de Maradi (Níger).

Maradi, Níger	Est. Met	GPCC	CRU
Media (mm)	473.2	474.6	528.7
Mediana (mm)	480.5	493.6	531.0
Desv. estándar (mm)	95.5	85.4	107.7
Varianzas similares		SÍ	SÍ
Coef. variación (%)	20.2	18.0	20.4
Año max precip	2003	1989	2010
Año min precip	1984	1987	1987
r respecto Est. Met		0.85	0.77
r² respecto Est. Met		0.71	0.59
Homogénea:			
Von Neumann	NO	SÍ	SÍ
Thom	SÍ	SÍ	NO

5.2.2 Comparación espacial entre el re-análisis GPCC y el índice SRI

El Sahel Rainfall Index (SRI) es un índice normalizado, relativo a la zona del Sahel, que muestra si la cantidad de precipitación en un determinado mes o año se sitúa por encima o por debajo de la media.

Para verificar cómo se comporta el índice respecto a los datos de precipitación GPCC, se ha calculado el coeficiente de correlación y determinación desde 1983 a 2012 utilizando como precipitación anual acumulada la correspondiente a los meses de junio a octubre de los datos GPCC, ya que el Sahel Rainfall Index se calcula respecto a estos meses.

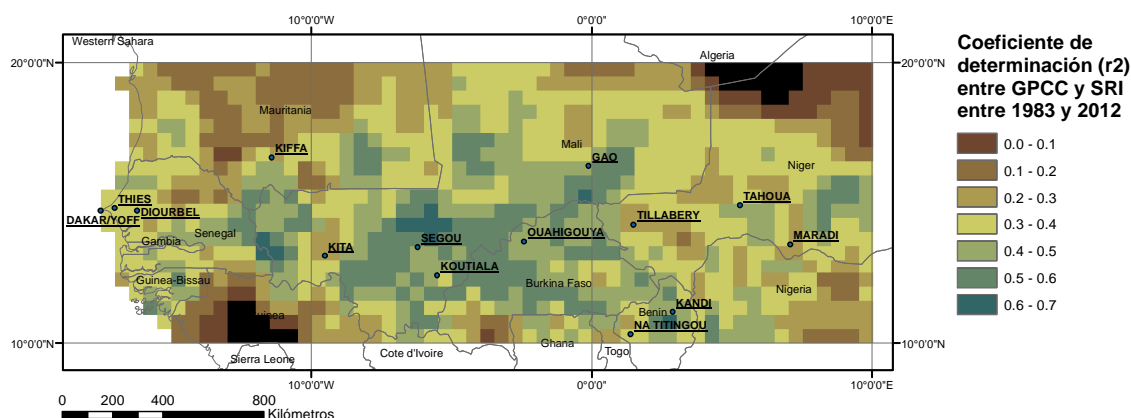


Figura 5.17. Coeficiente de determinación (r^2) entre el Sahel Rainfall Index y los datos de precipitación de 1983 a 2011. Se muestran las estaciones meteorológicas que han participado en la elaboración del SRI. Las celdas en color negro no tienen significación estadística con un p -value $< 0,05$.

El coeficiente de correlación, r , tiene valores positivos en toda el área de estudio exceptuando dos zonas periféricas una en Guinea y otra entre Níger y Argeria. El valor promedio del coeficiente de determinación (Figura 5.17) para todas las celdas ($n = 1.067$) es 0,34, con un valor máximo de 0,69. El 16,31 % de las celdas tienen valores comprendidos en el intervalo 0 y 0,2; el 51,83 % están situadas entre 0,2 y 0,4; el 30,83 % de los valores, entre el 0,4 y 0,6; y sólo el 1,03 % tienen valores superiores a 0,6.

Las zonas donde los coeficientes no son estadísticamente significativos corresponden a las áreas donde prácticamente nunca ha habido estaciones meteorológicas o bien no han reportado datos, como es el caso de Guinea.

5.2.3 Comparación de la distribución espacial de la interpolación GPCC y CRU

Las imágenes GPCC y CRU se han elaborado partiendo aproximadamente de los mismos datos, comprenden el mismo periodo de tiempo y tienen la misma resolución espacial; por tanto, parece lógico que las dos imágenes sean visualmente muy parecidas y que sus diferencias sean residuales y ocasionadas por el algoritmo de interpolación (Figura 5.18).

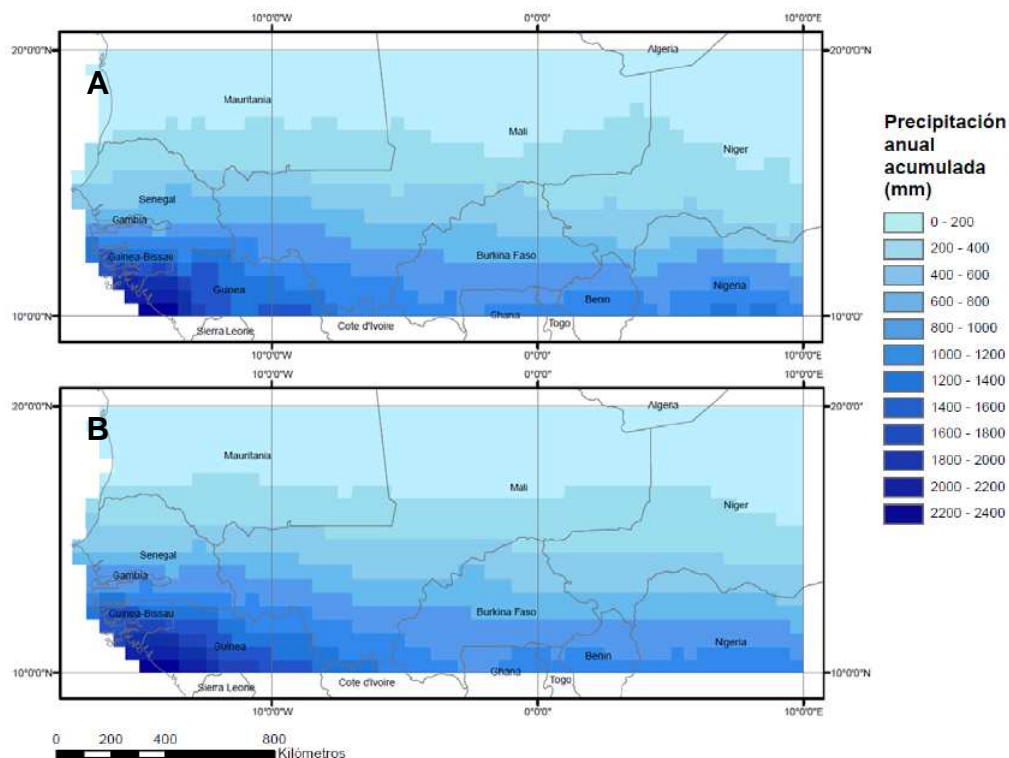


Figura 5.18. Precipitación anual acumulada, promedio para los datos GPCC (A) y CRU (B), entre 1983 y 2012.

Si se compara visualmente ambas imágenes (Figura 5.18) se observa que recogen de igual manera las áreas más húmedas y secas de la zona de estudio. Si se lleva a cabo un análisis con mayor detalle a través del cálculo del sesgo (Figura 5.19), se observa que gran parte de la superficie, en concreto el 73 % de las celdas, se encuentra entre valores comprendidos entre 0 y 50 mm de promedio por año. Las áreas donde la precipitación GPCC está sobrestimada respecto a CRU corresponden a la parte norte del territorio, especialmente en Malí y Mauritania; a la zona sureste, principalmente en Benín y Nigeria, y a la zona suroeste, la costa de Guinea y Guinea-Bissau.

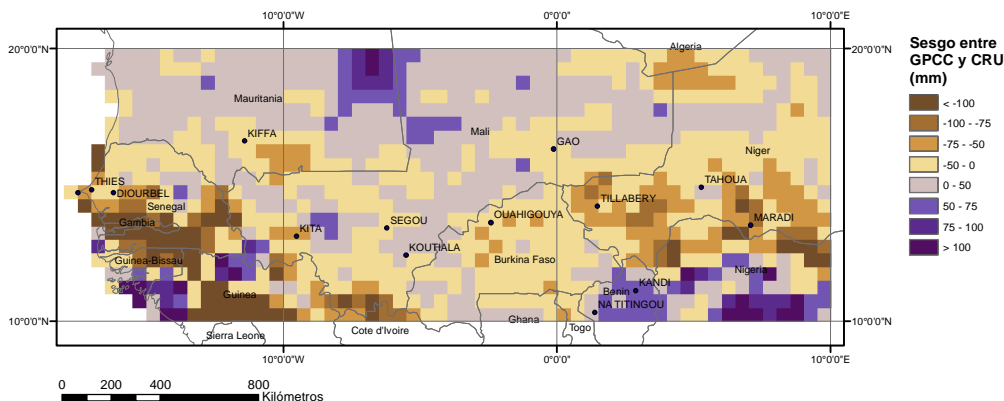


Figura 5.19. Sesgo entre los valores de precipitación GPCC y CRU. Los tonos morados indican valores sobrestimados de GPCC respecto a CRU.

La modelización lineal considerando GPCC como variable independiente y CRU como dependiente genera resultados cercanos a 1 tanto para el coeficiente de correlación como para el coeficiente de determinación en las latitudes medias del área de estudio, que es donde más variable es la precipitación. En cambio, en Guinea, Guinea-Bissau, la zona norte de Mauritania y Nigeria el coeficiente de determinación es bastante bajo, lo que podría relacionarse con la

disminución de estaciones meteorológicas a partir del año 1997 o 1998 principalmente en estos países (Figura 5.20).

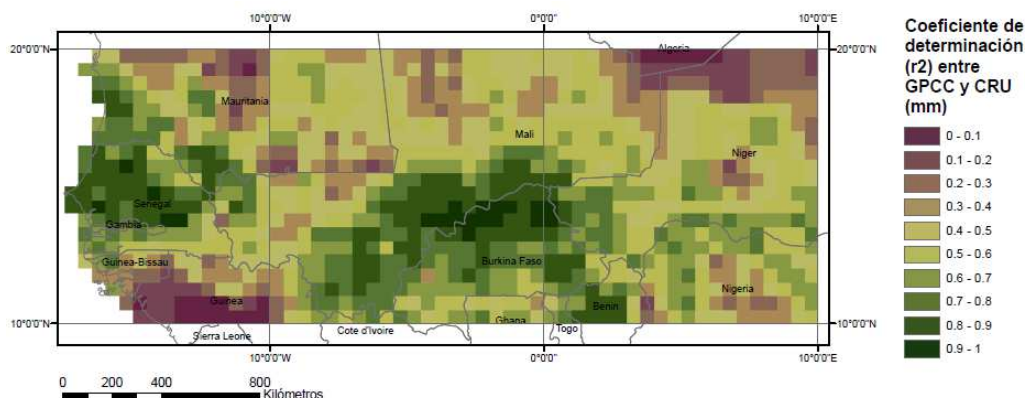


Figura 5.20. Coeficiente de determinación entre la precipitación GPCC y CRU, entre 1983 y 2012.

El número de estaciones meteorológicas que han participado en la elaboración de los mapas GPCC y CRU entre los años 1983 y 2012 ha disminuido de forma considerable; por ejemplo, para los mapas CRU en agosto de 1983 proporcionaron datos para el re-análisis 318 estaciones, y en el mismo mes de 2010 fueron sólo 49 estaciones; para los GPCC los valores son similares. Esta diferencia tan notable queda reflejada en los mapas de residuos de la regresión lineal calculada a partir de los mapas de precipitación anual acumulada entre los años 1983 y 2012 (Figura 5.21). Los residuos más elevados se registran en el año 2012, probablemente debido a que el número de estaciones que proporcionan valores es muy pequeño y, por lo tanto, el algoritmo de interpolación tiene que «inventar» muchos más valores.

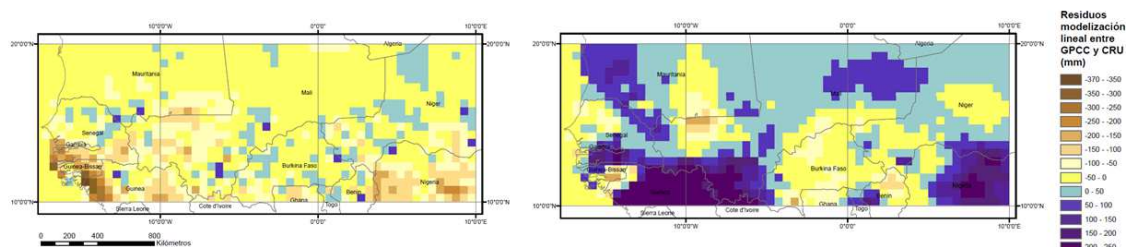


Figura 5.21. Residuos de la recta de regresión lineal para el año 1983 (izquierda) y 2012 (derecha). Los tonos marrones y ocres corresponden a residuos negativos y tonos azulados y amarillos a residuos positivos.

El valor promedio de los residuos de los datos correspondientes a 1983 se encuentran en torno a -40 mm; el hecho de que el signo promedio sea negativo significa que el término independiente, datos CRU, está subestimado respecto a los GPCC en la práctica totalidad de la zona estudiada (tonalidades marrones y ocres); en cambio, en el año 2010 el valor promedio de los residuos es de 39 mm, muy parecido en valor absoluto al del año 1983, pero en este caso los valores CRU están sobrestimados respecto a los GPCC; ahora bien, la diferencia viene marcada por las desviaciones típicas, en 1983 es de 52 mm y en 2010 de 93 mm.

Del análisis de tendencia temporal Theil-Sen para los datos del GPCC y del CRU (Figura 5.22 y Figura 5.23) con un nivel de confianza del 95 %, se desprende que existe una tendencia positiva en el tiempo más acusada en las latitudes más ecuatoriales. Si se compara con el test de significancia estadística Kendall-Man el resultado no es espacialmente coincidente en los dos conjuntos de datos.

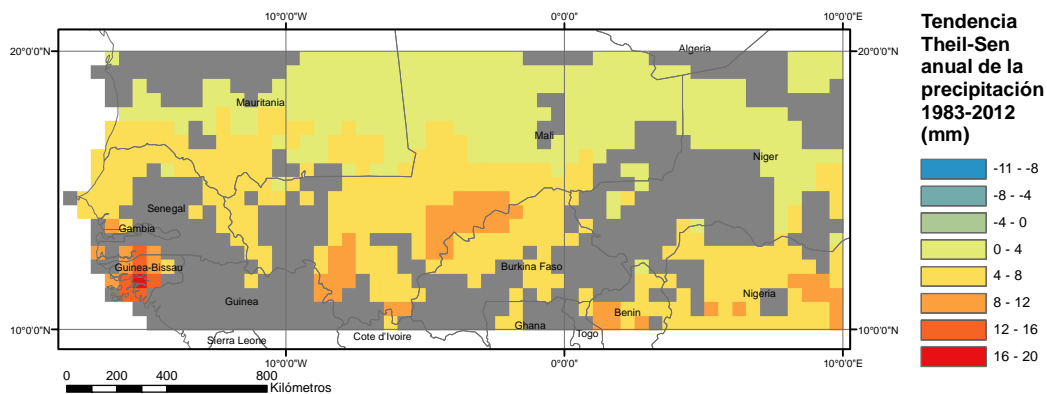


Figura 5.22. Tendencia temporal Theil-Sen y test de significación estadística Mann-Kendall con un nivel de confianza del 95 % para los datos del GPCC (en gris los píxeles sin significancia estadística).

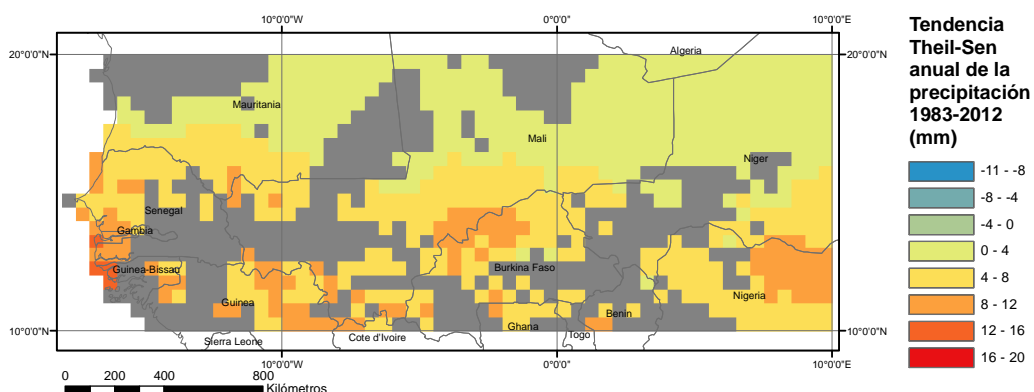


Figura 5.23. Tendencia temporal Theil-Sen y test de significación estadística Mann-Kendall con un nivel de confianza del 95 % para los datos del CRU (en gris los píxeles sin significancia estadística).

5.2.4 Resumen

El análisis entre las estaciones meteorológicas seleccionadas y los valores GPCC y CRU de las celdas donde se encuentran las estaciones muestran resultados coherentes, especialmente en aquellas estaciones meteorológicas que reportaron datos de forma continuada en los 30 años estudiados.

También se ha observado una buena coherencia entre los datos GPCC y el índice SRI; el coeficiente de determinación tiene valores elevados en aquellas zonas donde existen estaciones meteorológicas.

La comparación entre GPCC y CRU también es satisfactoria, lo que pone en evidencia que los mejores resultados se concentran en aquellas zonas con estaciones meteorológicas y que son peores en las zonas sin ellas. Por otro lado, la similitud entre los dos conjuntos durante el periodo inicial, la década de 1980, se degrada con el paso del tiempo y la desaparición de estaciones meteorológicas. El motivo es que los algoritmos, GPCC y CRU, tienen que interpolar una gran extensión con pocos datos.

En definitiva, los datos GPCC pueden servir como conjunto de validación teniendo en cuenta que el problema principal es la falta de datos procedentes de las estaciones meteorológicas entre finales de la década de 1990 y mediados de la década 2000, pero este mismo problema ha afectado a aquellas estimaciones de precipitación obtenidas por satélite y que se calibran a partir de estaciones meteorológicas.

5.3 Precipitación anual y otros parámetros estadísticos

En las últimas décadas, los avances tecnológicos han permitido obtener datos de estimación de precipitación procedentes de satélites de última generación. En este apartado se evaluará respecto a GPCC las dos series temporales más largas, ARC2 y TAMSAT, y las tres series, que, aunque son más cortas en el tiempo, aparentemente proporcionan mejor calidad, RFE2, TRMM 3B42, y GPCP-1dd.

Puesto que no existe un único parámetro estadístico que permita conocer el grado de semejanza o acuerdo existente entre los datos de referencia o validación y las estimaciones de precipitación, se aplicarán diferentes parámetros, como el coeficiente de variación, el sesgo (o bias), RMSE y el coeficiente de correlación.

La resolución temporal, el ámbito espacial y las dimensiones de las celdas de los mapas de precipitación tienen que ser iguales en todos los conjuntos de datos para poder comparar las estimaciones de precipitación con los datos de referencia. Todas las imágenes que se han procesado han sido recortadas al mismo ámbito geográfico, la resolución temporal se centra en el periodo de tiempo en el que coinciden los datos y se ha adaptado el tamaño de celda al de menor resolución espacial; este último paso se ha realizado sin inventar nuevas estimaciones de precipitación.

5.3.1 Distribución espacial

Es importante conocer la estructura espacial de la lluvia recogida por las diferentes fuentes de datos que permita tener una idea detallada de las áreas donde la precipitación es más abundante o más escasa. Por consiguiente, se han elaborado mapas de precipitación anual promedio del periodo 2001-2012 de los datos de validación, GPCC, y de las estimaciones de precipitación ARC2, TAMSAT, RFE2.0, TRMM 3B42 y GPCP-1dd (Figura 5.24).

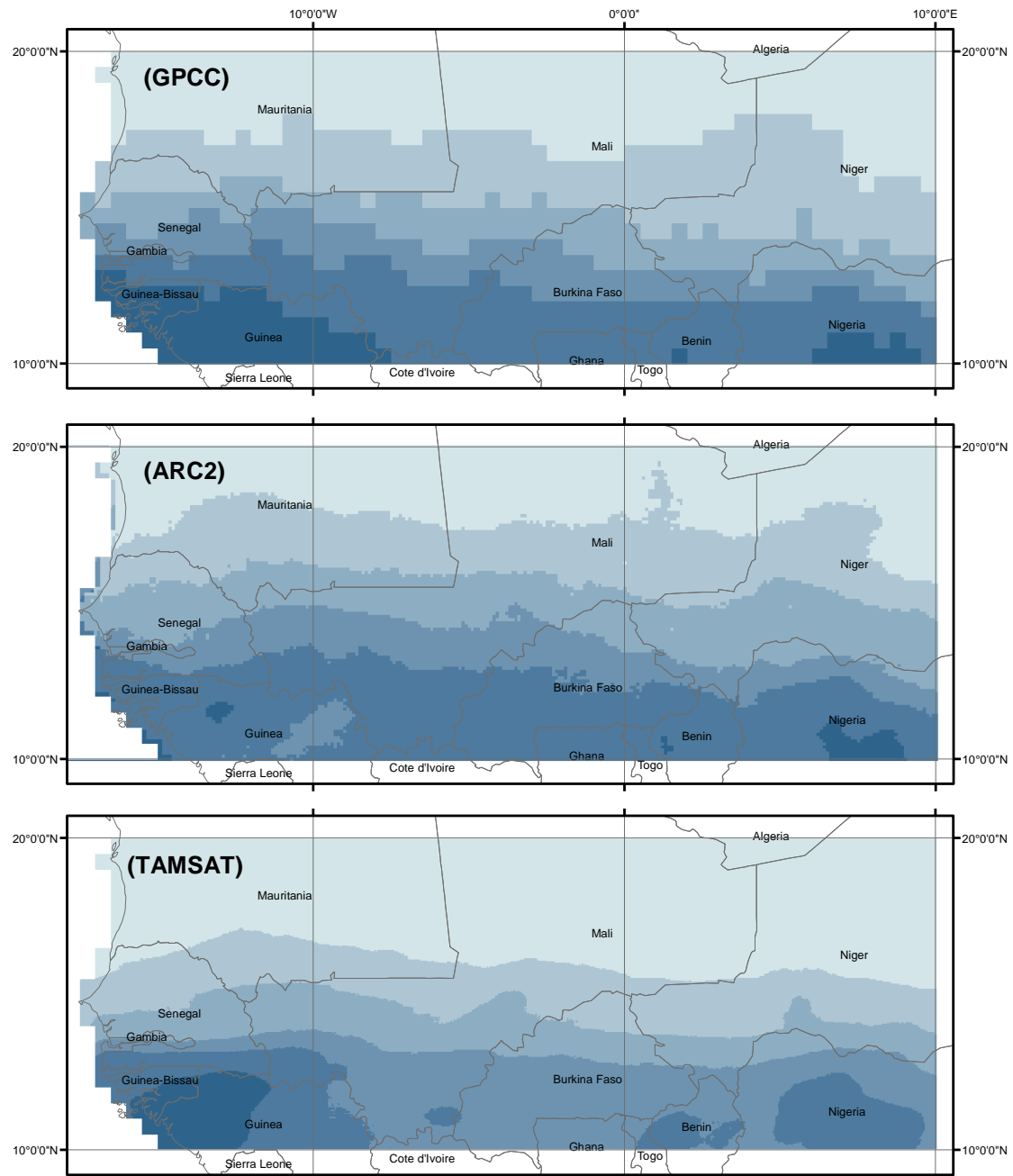
Tabla 5.6. Características de la distribución de la precipitación promedio anual para los productos GPCC, ARC2, TAMSAT, RFE2.0, TRMM 3B42 y GPCP-1dd del periodo 2001-2012 sobre el área de estudio.

	GPCC	ARC2	TAMSAT	RFE2.0	TRMM 3B42	GPCP- 1dd
Media (mm)	517,94	474,23	408,38	518,14	541,94	563,41
Mediana (mm)	517,17	469,24	408,34	510,55	534,10	566,18
Desv. Estándar (mm)	101,12	118,12	59,33	104,71	113,22	93,31
Coef. variación (%)	19,52	24,91	14,53	24,42	20,89	16,56

Todos los mapas (Figura 5.24) recogen de forma aproximada las áreas en las que se produce la máxima y la mínima precipitación anual. Existe un marcado gradiente de sur a norte, con picos máximos en Guinea y en Nigeria, y muy poca precipitación a partir del paralelo 18° N. Las semejanzas son evidentes, por el origen de sus datos, entre el par ARC2 y RFE2 y los datos TRMM 3B42.

El patrón espacial de la precipitación es bastante homogéneo, aunque existe una diferencia en la cantidad de lluvia registrada; por ejemplo, en Guinea, una de las zonas donde más llueve, la

diferencia entre valores es aproximadamente de unos 500 mm. Esta discrepancia se suaviza en las zonas más áridas.



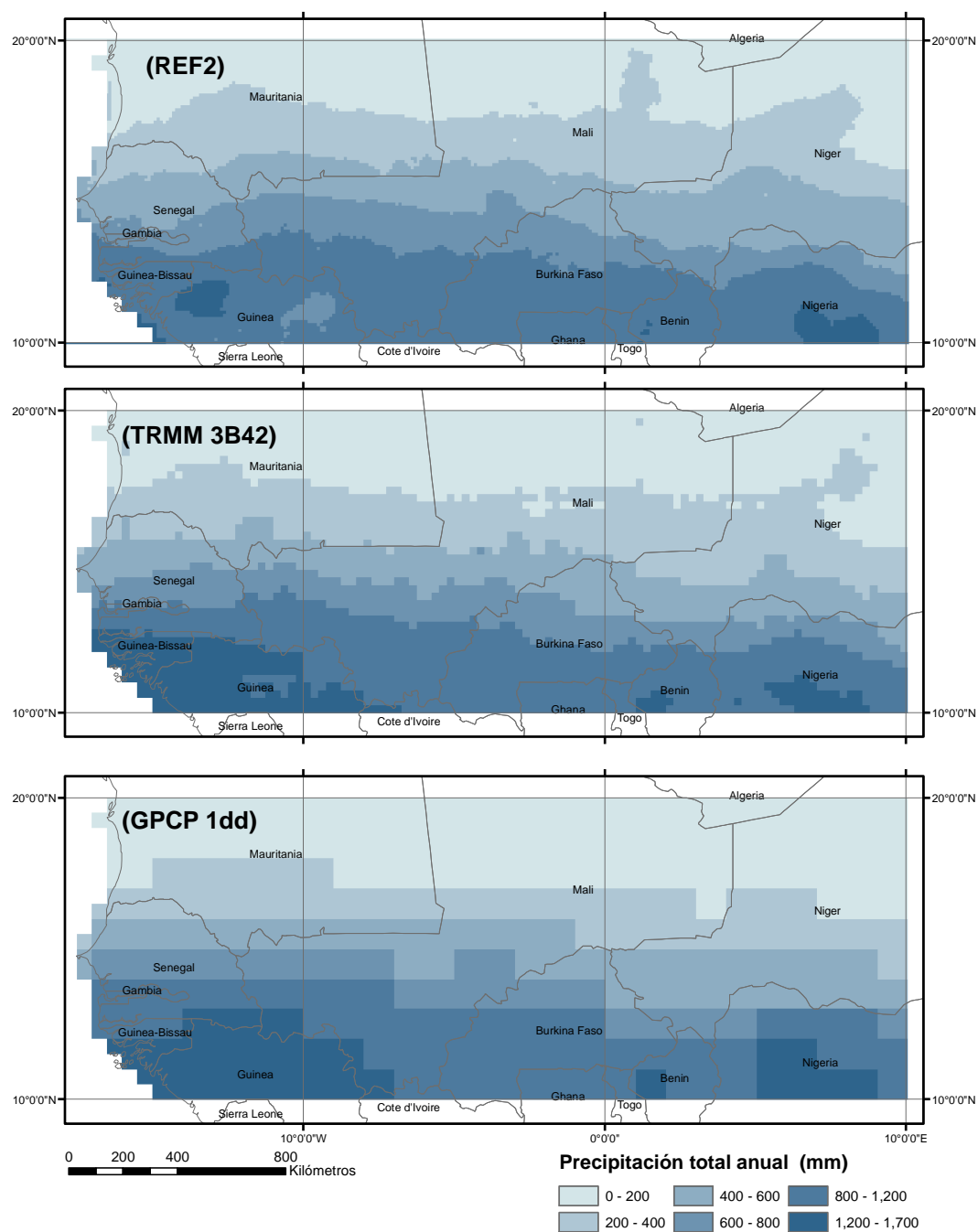


Figura 5.24. Precipitación media anual en el periodo 2001-2012.

Para analizar con más detalle la distribución espacial de la precipitación anual entre los años 2001 y 2012 se han construido perfiles de precipitación a través de los meridianos 14° O, 3° O y 8° E, y de los paralelos 11° N, 14° N y 18° N (Figura 5.25).

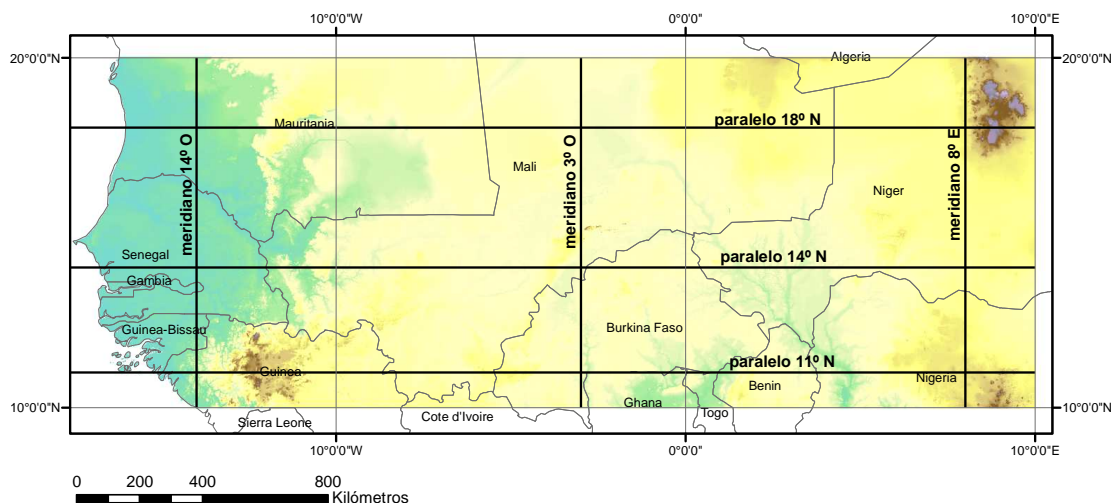
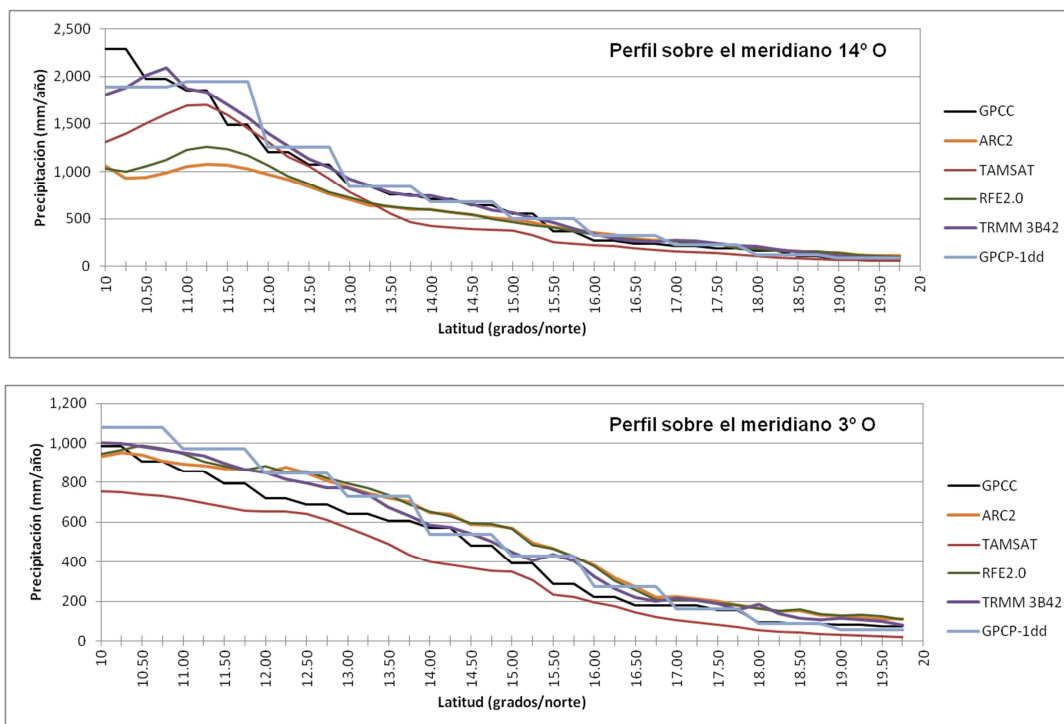


Figura 5.25. Distribución sobre la zona de la situación de los perfiles de precipitación.

En los perfiles se observa un fuerte gradiente sur-norte de la precipitación, aunque también se observa en la dirección este-oeste (Figura 5.26 y Figura 5.27).

La precipitación en la zona sur del meridiano 14° O se sitúa entre los 2.200 y los 1.000 mm/año, y en el sur del meridiano 8° E se sitúa entre los 1.500 y 1.000 mm/año (Figura 5.26). También se observa que a medida que nos desplazamos hacia el este los valores de todos los conjuntos de datos son similares entre ellos.



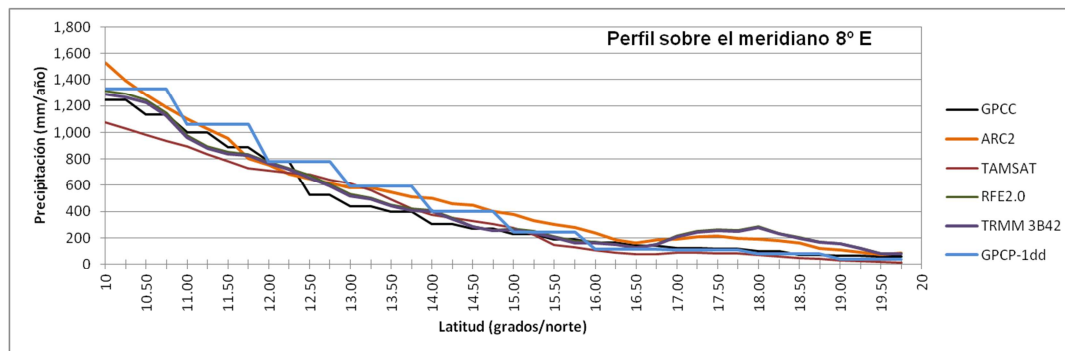
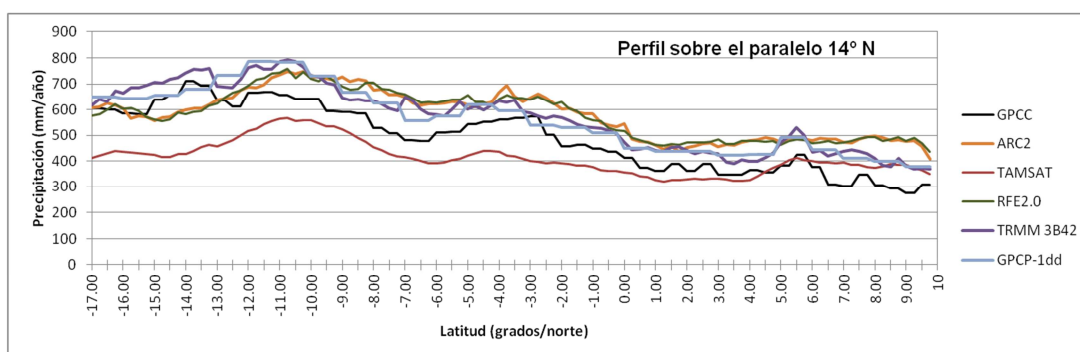
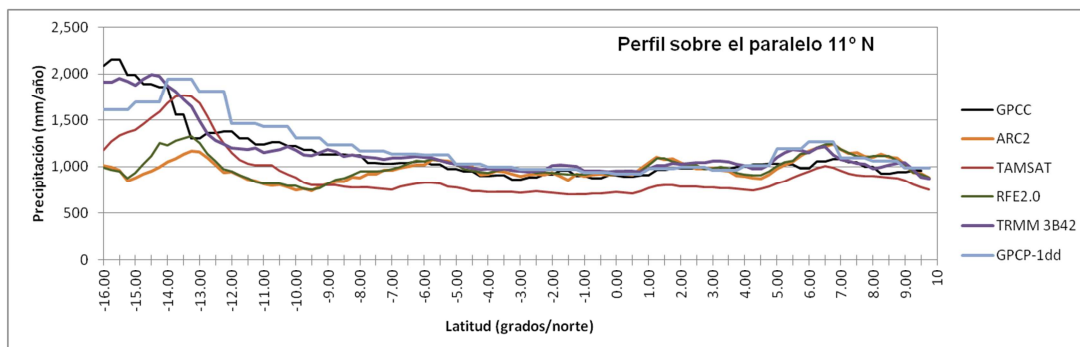


Figura 5.26. Perfil de precipitación anual entre los años 2001 y 2012 a través de los meridianos 14° O, 3° O y 8° E entre los paralelos 10° y 20° N.

La mayor precipitación se concentra en las longitudes al oeste del meridiano 7° O, principalmente entre los paralelos 10° y 15° N. También es en esta área donde se obtienen las mayores diferencias entre todos los conjuntos de datos de precipitación, que son del orden de 1.000 mm/año (Figura 5.27). Este hecho puede ser debido a que no se tienen datos de estaciones meteorológicas de Guinea y todos los algoritmos interpolan valores con muy pocos datos de referencia. Los valores más elevados corresponden a GPCP-1dd, seguidos por TRMM 3B42 y GPCC, con valores muy próximos entre ellos. El valor mínimo lo obtiene TAMSAT. Otra zona donde se observa bastante precipitación (Figura 5.27) está situada al este del meridiano 4,5° E, entre los paralelos 10° y 13° N, los valores TAMSAT siguen siendo los que estiman menos precipitación y los de máxima estimación los GPCP-1dd.



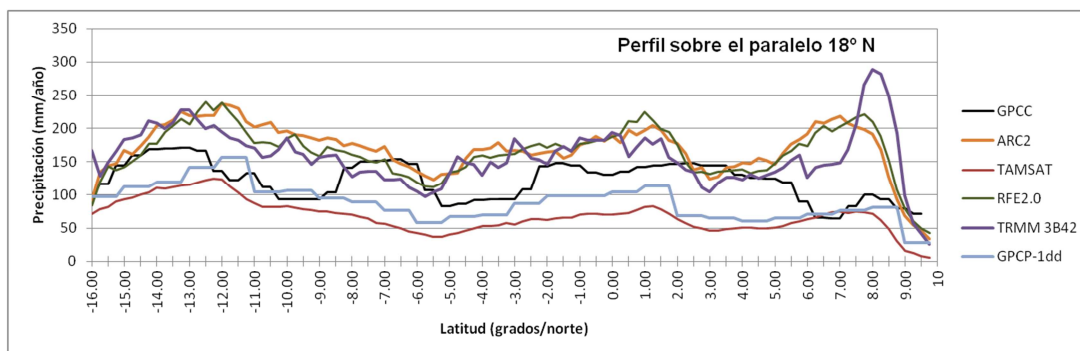


Figura 5.27. Perfil de precipitación anual entre los años 2001 y 2012 a través de los paralelos 11°, 14° y 18° N, entre los meridianos 16° O y 10° E.

Los datos TAMSAT en toda la zona de estudio son los que recogen los valores inferiores de precipitación. En cambio, los datos ARC2 y RFE2 obtienen los valores más elevados en la zona norte, donde se producen los mínimos anuales, y en la zona de transición. Los valores superiores de precipitación en la zona sur corresponden a los datos GPCP-1dd.

En el área donde se produce la máxima variabilidad interanual, la más influida por el monzón, sobre las latitudes comprendidas entre los 14° y los 16° N, la precipitación obtenida por todos los conjuntos es muy parecida.

En la zona norte por encima del paralelo 15° N todos los productos coinciden bastante en la cantidad de precipitación recogida, los que estiman más y que coinciden en cuantía son ARC2, RFE y TRMM 3B42, los que estiman menos en promedio, GPCP-1dd y TAMSAT.

5.3.2 Variabilidad pluviométrica

El coeficiente de variación anual indica el grado de heterogeneidad u homogeneidad de la precipitación durante el período estudiado. De manera que los valores altos indican una heterogeneidad interanual de la precipitación; en cambio, los valores bajos señalan homogeneidad. En España la variabilidad mínima se encuentra en Galicia y la franja cantábrica, con valores inferiores al 20 %, y la máxima, en la región murciana, sobre el 40 % (Martín Vide, 2011).

Tabla 5.7. Promedio de variabilidad pluviométrica anual y superficie (en %) en intervalos entre el año 2001 y 2012.

	Promedio (%)	Superficie en % de valores comprendidos entre			
		0 y 20 (%)	20 y 40 (%)	40 y 60 (%)	> 60 (%)
GPCC	26,43	45,36	40,30	13,31	1,03
ARC2	23,87	38,89	55,22	5,28	0,61
TAMSAT	21,95	62,17	29,77	8,05	0,01
RFE2.0	24,42	40,13	53,30	6,03	0,54
TRMM-3B42	28,36	34,35	48,95	13,94	2,76
GPCP-1dd	23,79	50,42	37,49	11,34	0,75

En la zona de estudio, se ha calculado para cada celda el coeficiente de variabilidad a partir de los datos anuales totales en el periodo comprendido entre 2001 y 2012 (Figura 5.28 y Tabla 5.7). En ellas se observa un marcado gradiente norte sur, donde los valores más bajos corresponden a las latitudes inferiores, y a medida que nos desplazamos hacia el norte la

variabilidad aumenta. El algoritmo TAMSAT muestra valores muy bajos para la zona de estudio.

Algunos mapas que representan el coeficiente de variación muestran ciertas similitudes, en especial ARC2 y RFE2.0.

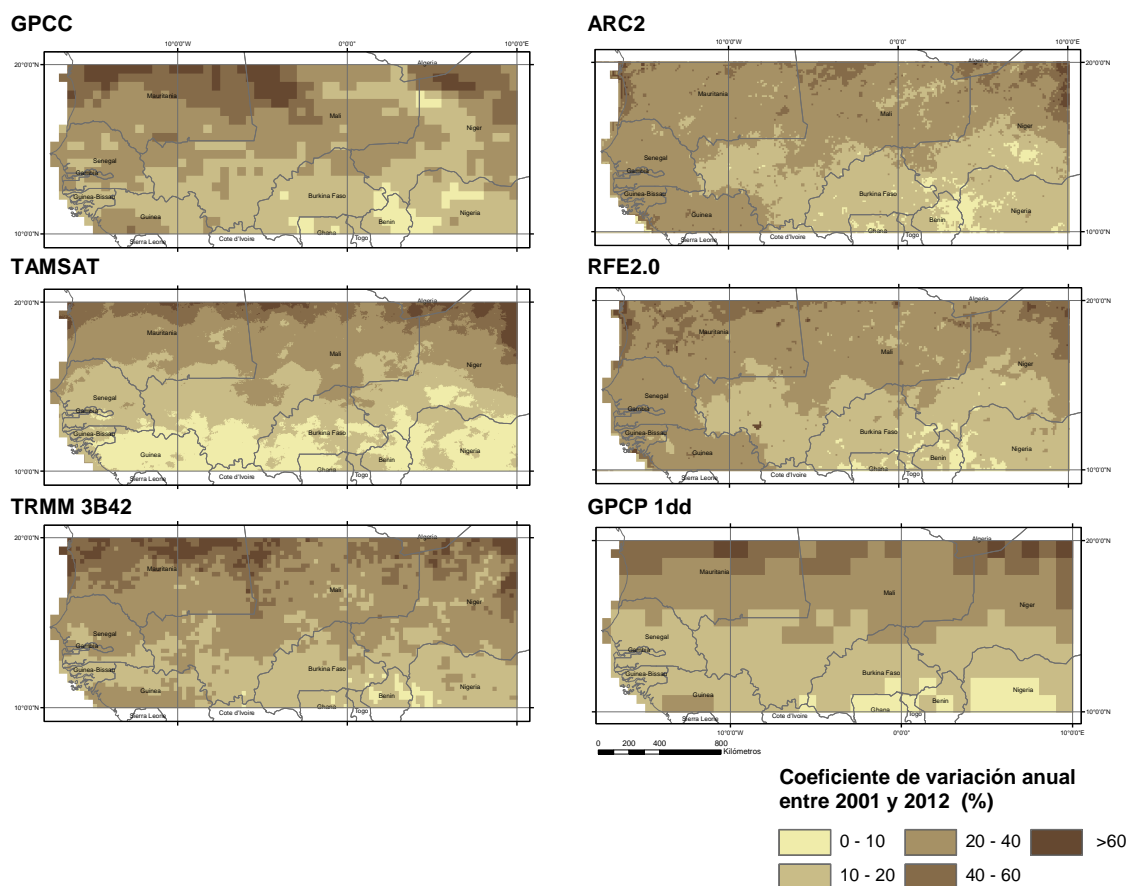


Figura 5.28. Coeficiente de variación entre 2001 y 2012 para los datos GPCC, ARC2, TAMSAT, RFE2.0, TRMM3B42 y GPCP-1dd.

5.3.3 Sesgo o bias

El valor óptimo del sesgo es 0, lo que quiere decir que no existe ninguna diferencia entre los valores analizados. El sesgo (o bias) se ha calculado con valores de precipitación anual, siempre respecto a los datos GPCC considerados como «verdad terreno».

Tabla 5.8. Resumen sesgo entre 2001 y 2012.

	Promedio anual (mm)	% del área con valores comprendidos entre:		
		-50 y 50 mm	-100 y 100 mm	-150 y 150 mm
ARC2	-5,79	39,83	71,26	86,86
TAMSAT	-109,95	24,35	57,56	74,77
RFE2.0	-11,39	56,54	75,45	90,21
TRMM 3B42	22,06	69,42	94,49	97,66
GPCP-1dd	46,69	53,33	76,38	88,28

El sesgo anual ha sido calculado para el intervalo de tiempo en que coinciden todos los algoritmos de estimación de precipitación, del año 2001 a 2012, lo que ha permitido obtener el valor promedio anual y el porcentaje de superficie entre intervalos (Tabla 5.8).

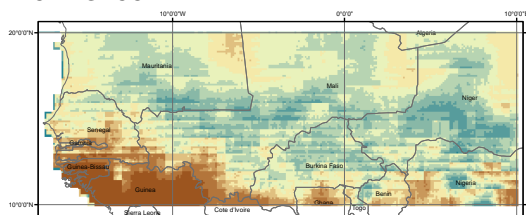
Los mapas resultantes del sesgo anual entre 2001 y 2012 permiten situar espacialmente las zonas donde se concentran los mejores resultados y también donde se hallan los puntos débiles de las observaciones. En la Figura 5.29 se muestran los resultados: los tonos azules indican signo positivo y significa que los valores de la estimación de precipitación son superiores a los recogidos por los valores de referencia; los tonos marrones tienen signo negativo e indican lo contrario, es decir, los valores GPCC son superiores en valor.

El sesgo promedio entre los valores GPCC y ARC2 es de $-5,79$ mm/año y es el valor más bajo de todos los pares calculados. Los valores negativos se concentran en Guinea, Guinea Bissau y Ghana; el resto de territorio tiene valores positivos pero relativamente bajos (Figura 5.29).

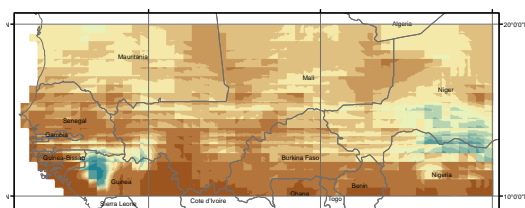
El sesgo promedio entre el año 2001 y 2012 para el algoritmo TAMSAT y GPCC (Figura 5.29) tiene un valor de $-109,95$ mm/año; los valores extremos se sitúan en la costa y en la zona interior de Guinea. Las zonas con más precipitación GPCC respecto a TAMSAT se localizan en la parte sur de la zona de estudio y en las costas de Gambia, Guinea-Bissau y Guinea.

En la comparación de los datos RFE2.0 con los GPCC (Figura 5.29) se observa que el suroeste del área de estudio los valores GPCC están sobrestimados; es especialmente en Guinea-Bissau y Guinea donde se registran los valores más elevados de sesgo. En las latitudes medias y superiores se encuentra la zona con mejor resultado.

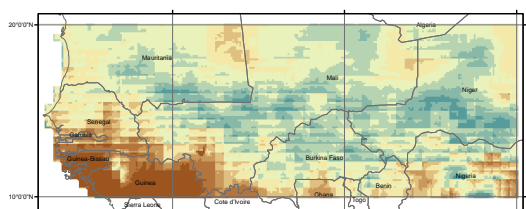
ARC2 – GPCC



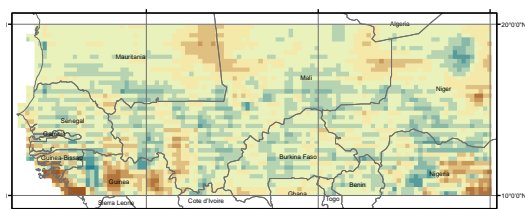
TAMSAT – GPCC



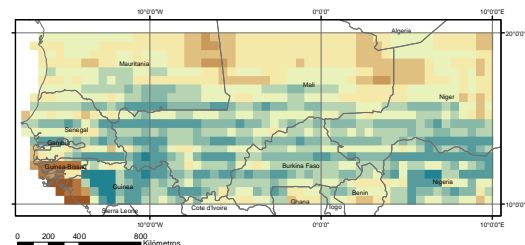
RFE2 – GPCC



TRMM 3B42 – GPCC



GPCP-1dd – GPCC



Sesgo entre 2001 y 2012 (mm/año)

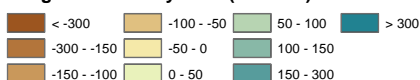


Figura 5.29. Sesgo entre las estimaciones de precipitación y GPCC de 2001 a 2012. En tonos marrones los valores sobrestimados por GPCC y en tonos azules los sobrestimados por las estimaciones de precipitación.

Las estimaciones de precipitación TRMM 3B42 concuerdan bastante bien con los valores GPCC: el 69,42 % de la superficie tiene valores de sesgo inferiores o iguales a 50 mm (el

34,5 % tiene sesgo negativo y el 65,5 % positivo). Los valores más elevados (en valor absoluto) se encuentran en la costa y en la zona montañosa del interior de Guinea. El algoritmo TRMM 3B42 es, de todos los analizados, el que consigue los mejores resultados de sesgo (Figura 5.29).

El contraste de valores más elevados tanto positivos como negativos se encuentra en Guinea-Bissau y Guinea para el sesgo entre GPCP-1dd y GPCC (Figura 5.29). El resto del área de estudio fluctúa principalmente entre valores de -150 mm/año y 150 mm/año.

Los datos TAMSAT, tanto por el bajo CV, como por el elevado sesgo, parecen ser los menos fiables.

5.3.4 RMSE

El valor del RMSE se ha calculado con el promedio de precipitación mensual de toda el área para cada uno de los algoritmos y siempre respecto a los datos GPCC.

Tabla 5.9. Resultado RMSE anual, unidades mm/mes.

Año	ARC2	TAMSAT	RFE	TRMM 3B42	GPCP-1dd
2001	13,67	12,41	9,6	4,57	7,63
2002	8,20	6,83	7,46	3,69	6,66
2003	12,19	17,23	8,51	6,31	8,86
2004	9,59	10,23	13,05	4,22	6,69
2005	5,25	10,89	4,94	2,93	3,26
2006	7,68	12,97	7,81	6,38	11,98
2007	7,52	17,17	8,32	4,69	8,36
2008	5,94	11,55	7,85	5,35	8,87
2009	6,63	11,31	9,06	3,43	3,1
2010	11,18	8,48	11,34	12,67	15,42
2011	7,63	12,29	6,41	7,86	8,49
2012	11,15	28,36	9,98	6,57	5,24

Los resultados del RMSE (Tabla 5.9) muestran que los datos TRMM 3B42 son los más bajos en comparación con el resto de los valores. Las estimaciones TAMSAT tienen los valores más altos de RMSE. En el año 2010, todos los resultados de RMSE acusaron un incremento, excepto los datos TAMSAT.

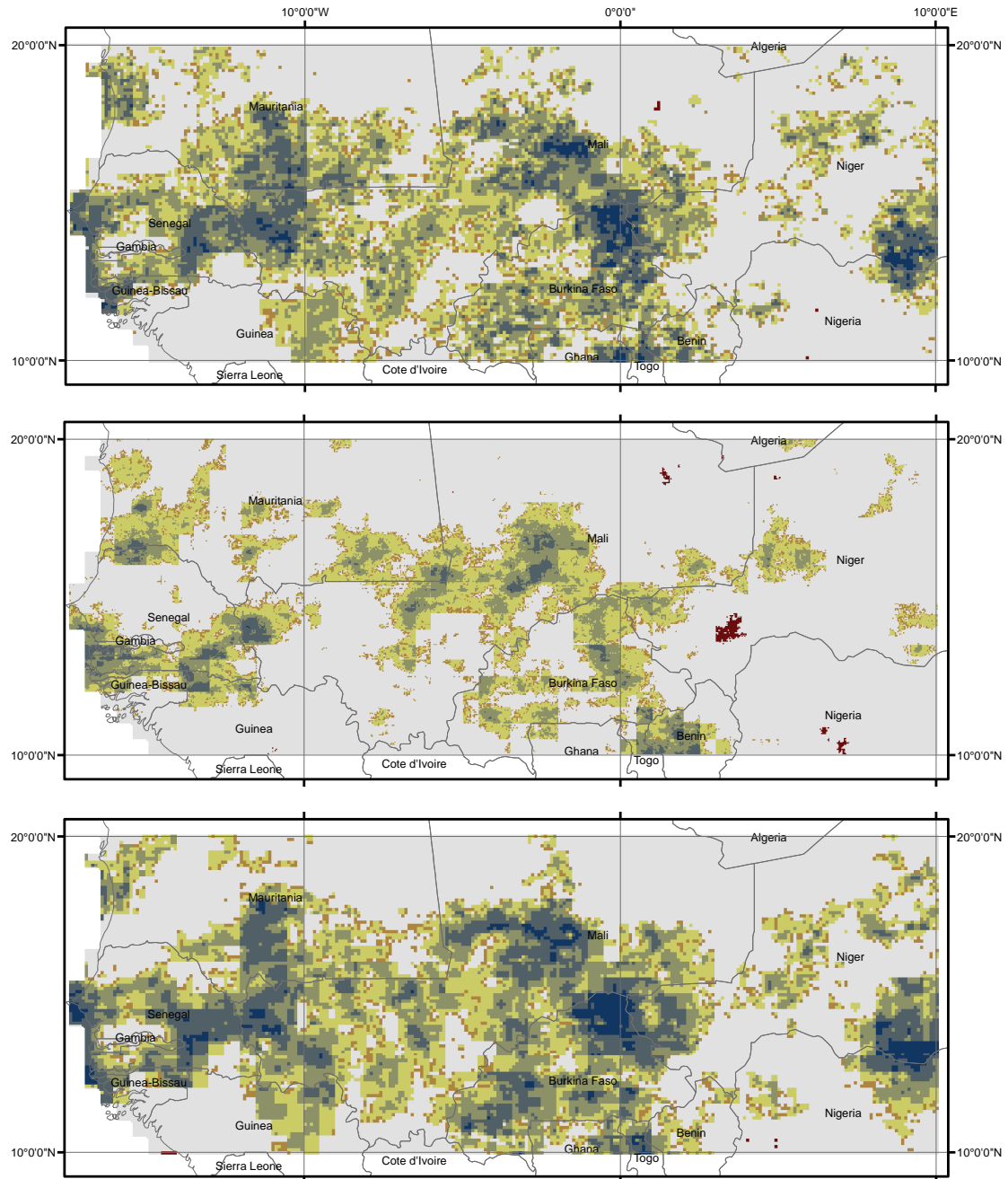
En el cómputo del RMSE se constata que los mejores resultados se obtienen con el algoritmo TRMM 3B42; el peor resultado corresponde a los datos TAMSAT.

5.3.5 Regresión lineal

En este epígrafe se han obtenido los coeficientes de correlación y determinación entre los datos anuales de GPCC y cada una de las estimaciones de precipitación en el periodo comprendido de 2001 a 2012. En total, seis mapas para cada uno de los coeficientes, aunque,

por economía de espacio, sólo se mostrarán los mapas correspondientes al coeficiente de correlación.

En todos los análisis se ha considerado como variable dependiente la estimación de precipitación (ARC2, TAMSAT, RFE2, TRMM 3B42 y GPCP-1dd) y como variable independiente los datos de referencia (GPCC).



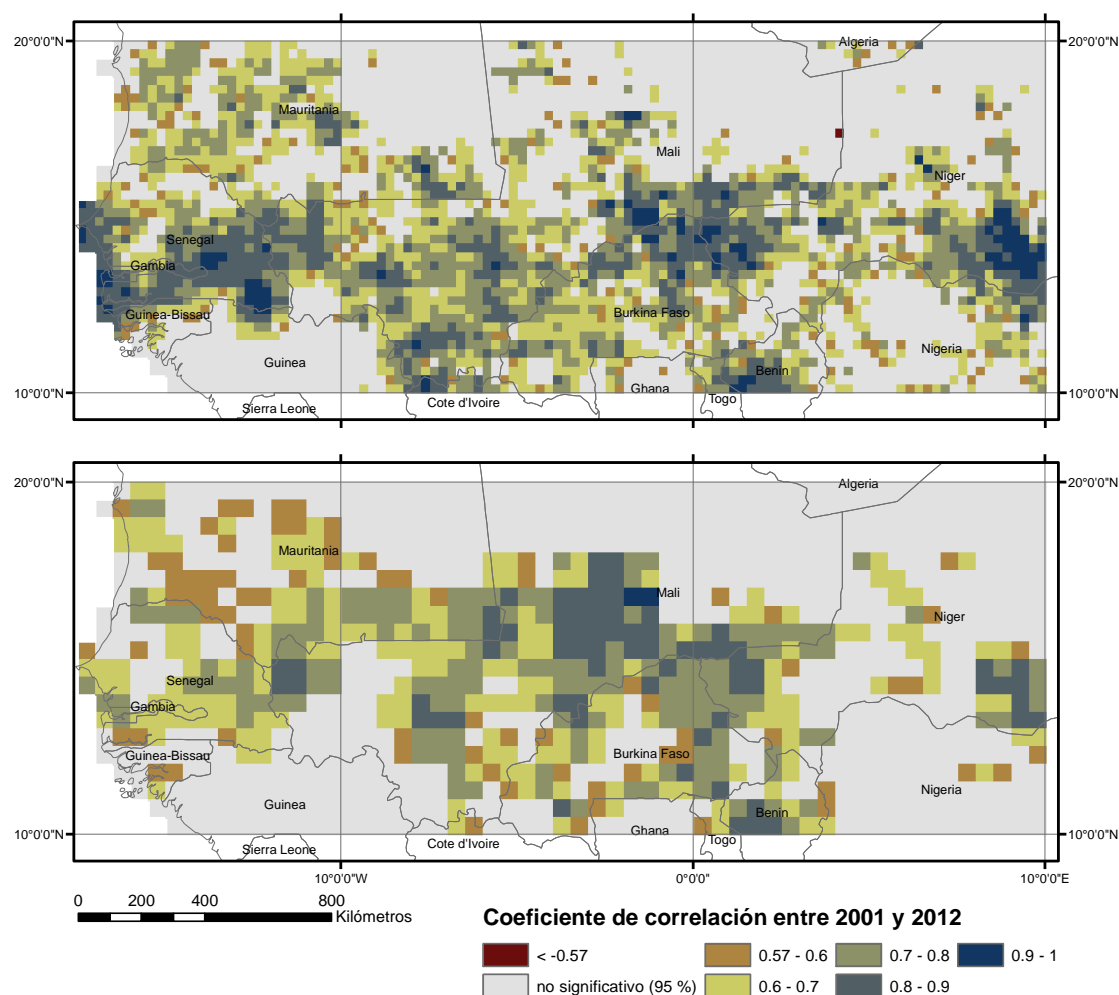


Figura 5.30. Coeficiente de correlación entre GPCC y ARC2, TAMSAT, RFE2, TRMM 3B42 y GPCP-1dd, respectivamente.

En las áreas con significación estadística (95 %) el coeficiente de correlación muestra valores elevados. Los niveles más altos del coeficiente en prácticamente todos los mapas se sitúan en la zona más central, entre los paralelos 13° N y 16° N. La distribución espacial de la correlación GPCC y ARC2 y GPCC y REF2 coincide; esto se debe a que los datos en origen de ARC2 y RFE2 son muy parecidos.

5.4 Análisis y comparación de la de precipitación entre 1983 y 2012

Tener registros de la precipitación de más de 30 años de los datos GPCC, ARC2 y TAMSAT tiene que permitir estudiar el comportamiento de la precipitación entre 1983 y 2012.

5.4.1 Tendencia de la precipitación entre 1983 y 2012

La tendencia interanual se ha calculado a partir de la pendiente Theil-Sen con un nivel de confianza en el test Mann-Kendall del 95 %.

La precipitación, en los tres conjuntos de datos, ha aumentado de forma generalizada en toda el área de estudio, aunque el mapa de tendencia ARC2 (Figura 5.31) es el único que muestra valores negativos: lugares donde la precipitación ha disminuido a lo largo de estos 30 años,

una tendencia negativa que se sitúa en los extremos inferiores del área de estudio, Guinea y Nigeria. En cambio, los datos GPCC y TAMSAT muestran un aumento más acusado de la precipitación en esas mismas zonas.

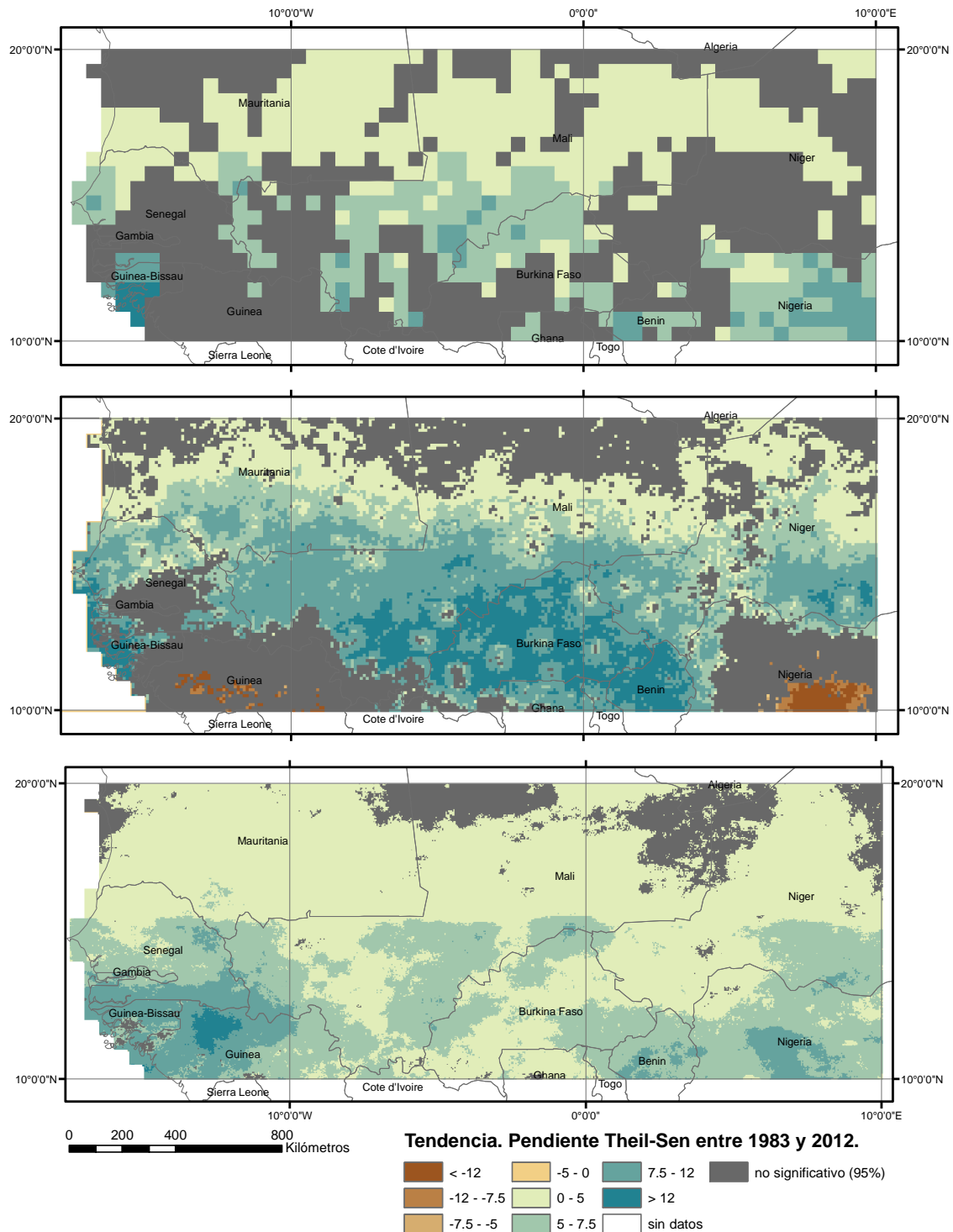


Figura 5.31. Mapa de tendencia para los datos GPCC (arriba), ARC2 (en medio) y TAMSAT (abajo) entre 1983 y 2012. En gris se muestra los valores que no son estadísticamente significativos para el test Mann-Kendall con un nivel de confianza del 95 %.

Cuantificando la tendencia de la precipitación y la significación estadística se tiene que el 50,4 % de la superficie en el mapa de tendencia GPCC (Figura 5.31) tiene significación estadística; estas celdas tienen una pendiente positiva de 4,61 mm/año de promedio. El mapa

ARC2 muestra tendencia significativa en un 66,9 %, el 97,7 % de la cual es positiva con una pendiente promedio de 7,7 mm/año, mientras que el 2,3 % de la superficie muestra una tendencia negativa con una pendiente de 13,4 mm/año. El 90,9 % del territorio en el mapa TAMSAT muestra significación estadística con una pendiente de 4,46 mm/año.

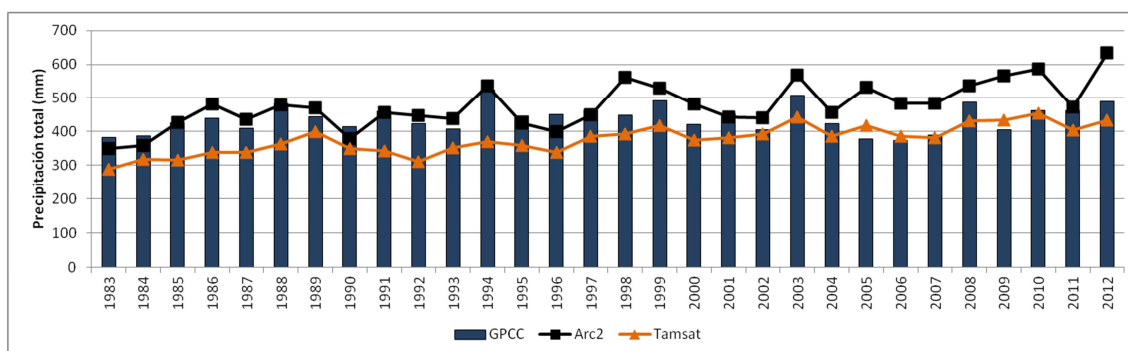


Figura 5.32. Precipitación anual GPCC, ARC2 y TAMSAT de 1983 a 2012.

En resumen, los datos ARC2 son los que muestran un aumento superior de la precipitación con valores máximos en Burkina Faso, Benín y la costa de Guinea Bissau. En cambio, los datos TAMSAT son los que aportan una tendencia inferior; aunque esta es positiva, los valores más elevados de la pendiente se registran en las latitudes más bajas y en las zonas de topografía más compleja. Los datos GPCC muestran poca significación estadística en la mayoría del territorio.

El incremento de la precipitación se muestra más acusado al principio de la época estudiada que hacia el final de ella para los conjuntos de datos GPCC y TAMSAT (Figura 5.32). En el inicio de la década de 1980 hubo alguno de los episodios de sequía más intensos que se recuerda; por lo tanto, partiendo de este escenario, con la simple recuperación del régimen de lluvias «normales» se entiende que pueda existir una tendencia positiva, aunque por debajo de los niveles de precipitación que prevalecieron en la región de 1930 a 1965. Algunos autores, previamente, han identificado este hecho y han remarcado 1988 como el año en el que la precipitación empieza a recuperarse (Kandji et al., 2006; Kaspersen et al., 2011; Nicholson, 1993).

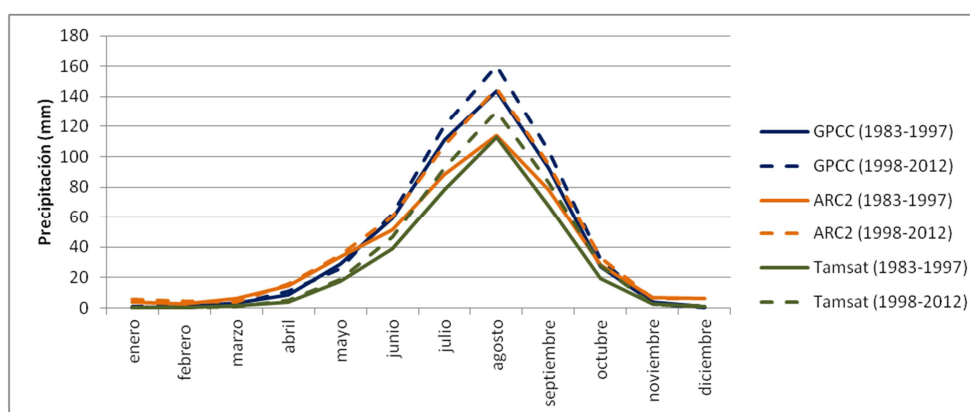


Figura 5.33. Precipitación mensual promedio para el intervalo de 1983 a 1997 y de 1998 a 2012 para los datos GPCC, ARC2 y TAMSAT.

La pendiente de la precipitación es más acusada para los valores de precipitación ARC2 (5,2 mm/año), seguida por los valores TAMSAT (4,01 mm/año), y la más suave corresponde a GPCC (0,7 mm/año).

También se observa un incremento de la precipitación en los últimos 15 años analizados para todos los conjuntos de precipitación (Figura 5.33). La diferencia máxima de precipitación registrada se produce en el mes de agosto.

Aunque la tendencia interanual de la precipitación es positiva en los tres conjuntos de datos, sin embargo, es interesante estudiar el comportamiento específico de cada uno de los meses de la época húmeda, de junio a septiembre. En la Figura 5.34 se observa que la tendencia de la precipitación de los cuatro meses y para los tres conjuntos analizados es positiva. Ahora bien, la pendiente más elevada se produce en el mes de agosto, mientras que la pendiente de junio es prácticamente horizontal. Esto significa que el aumento de la precipitación anual se concentra en el mes de agosto y en menor medida en los meses de julio y septiembre.

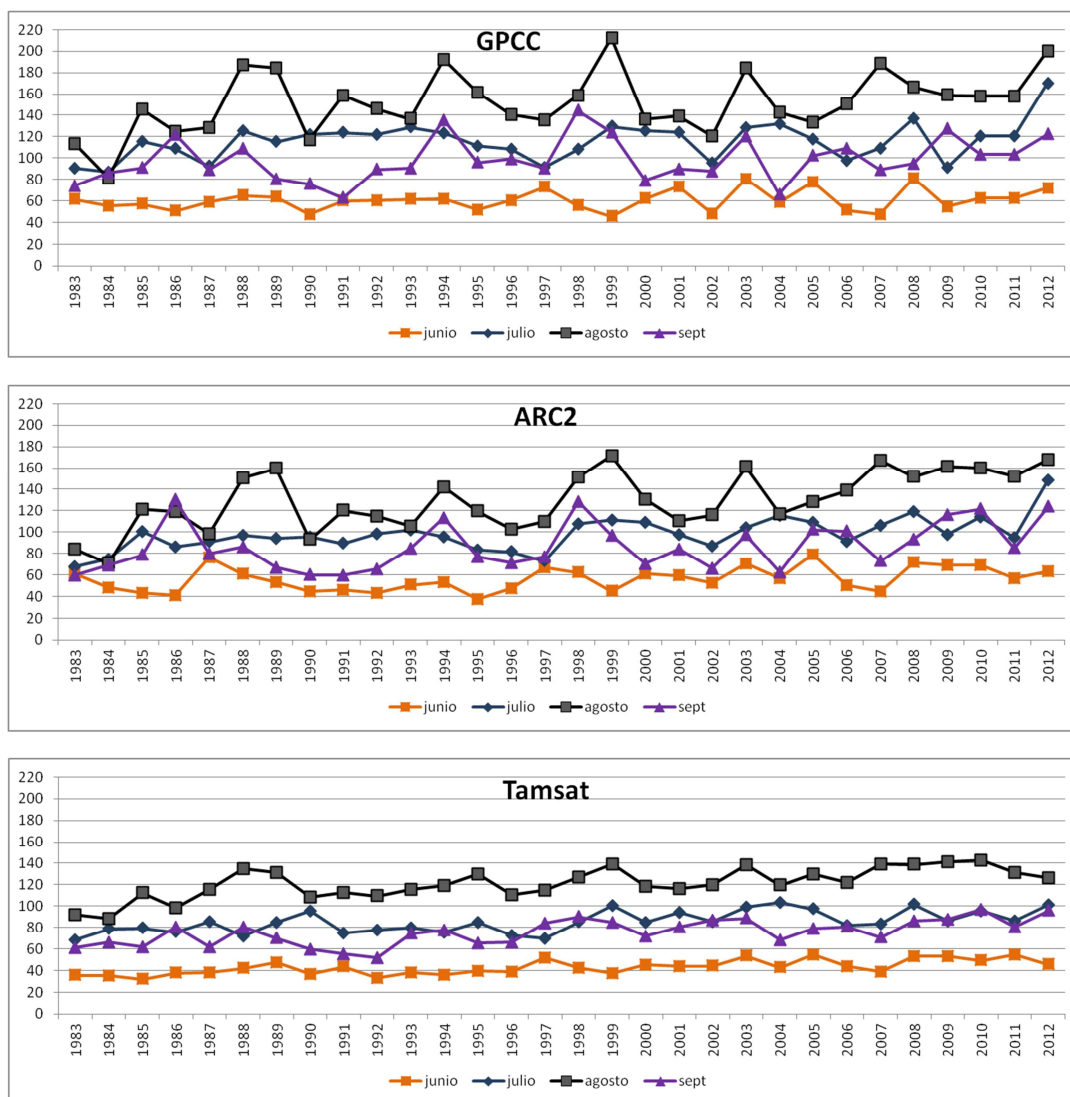


Figura 5.34. Valor de la precipitación mensual para los meses de junio, julio, agosto y septiembre de GPCC, ARC2 y TAMSAT.

5.4.2 Sesgo

Los resultados del sesgo entre 1983 y 2012 de las estimaciones de precipitación ARC2 y TAMSAT respecto a GPCC son muy parecidos espacialmente al obtenido en el intervalo de tiempo de 2001 a 2012.

El mejor resultado se ha obtenido entre ARC2 y GPCC con un valor promedio de $-27,66$ mm/año. El 52,08 % de la superficie tiene un sesgo inferior a 50 mm/año (en valor absoluto).

En cambio, el sesgo promedio para los datos TAMSAT es de -127 mm/año. La superficie con un sesgo de 50 mm/año es del 22,89 %.

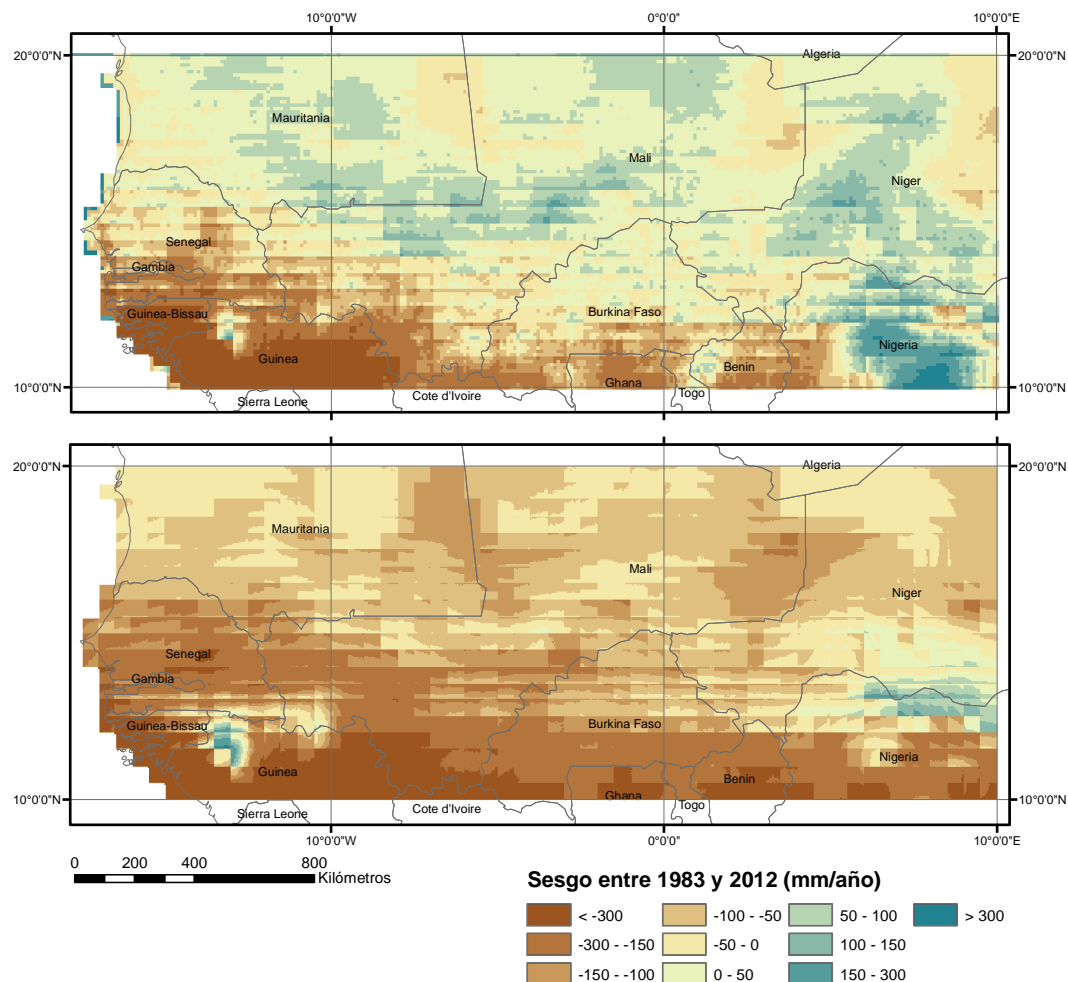


Figura 5.35. Sesgo entre las estimaciones de precipitación ARC2 y GPCC (arriba) y entre TAMSAT y GPCC (abajo) de 1983 y 2012. En tonos marrones los valores sobrestimados por GPCC y en tonos azules los sobrestimados por ARC2 y TAMSAT.

5.4.3 Comparación en puntos seleccionados

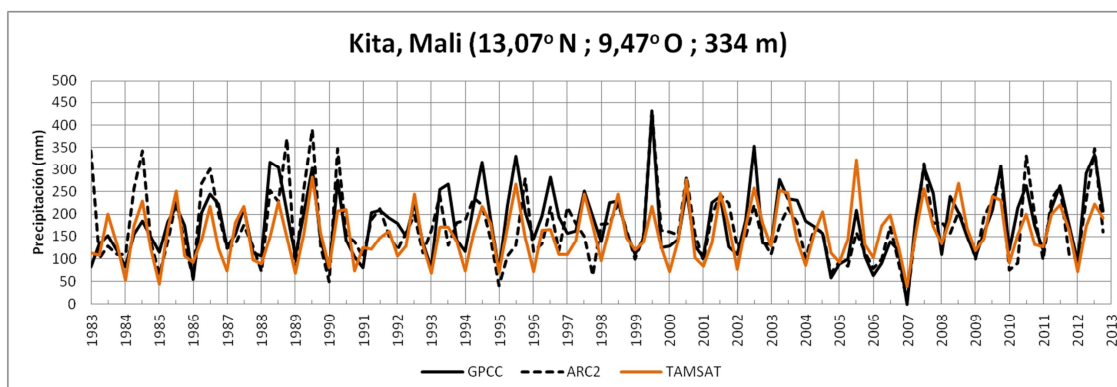
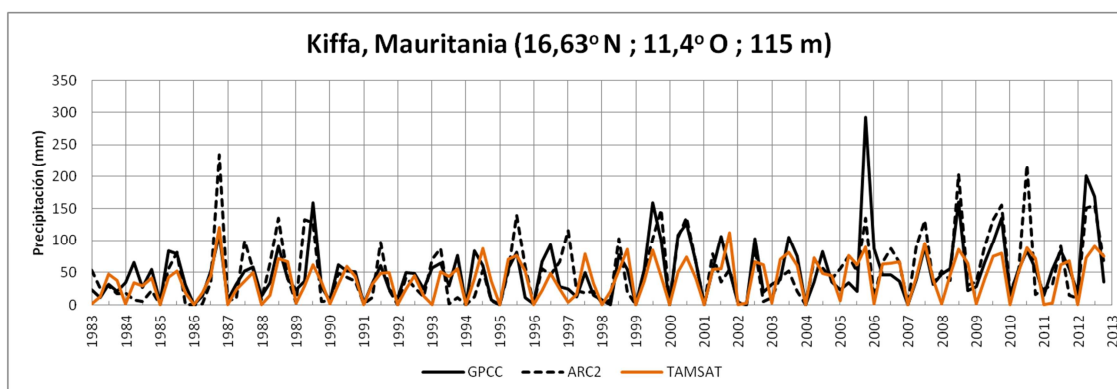
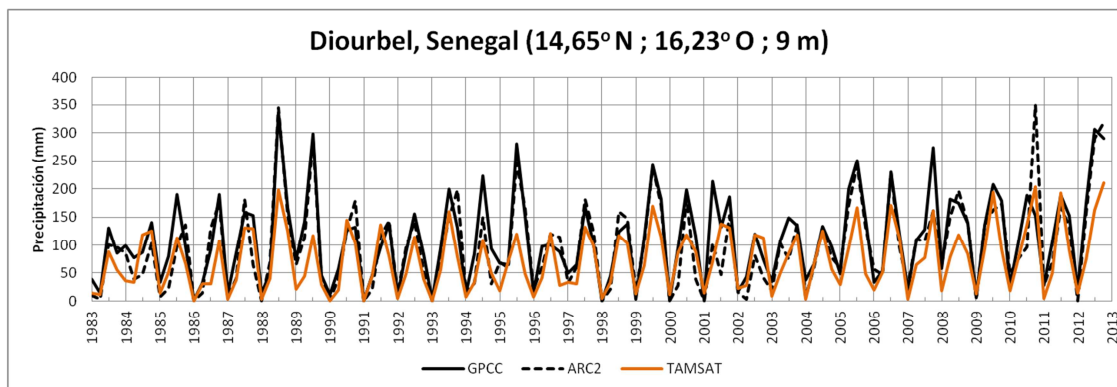
Es interesante observar de forma puntual el comportamiento de la precipitación durante los 30 años del estudio, para ello, se han seleccionado siete localizaciones que cubren de forma aproximada diferentes variaciones climáticas de la zona. Estas localizaciones corresponden a las de las estaciones meteorológicas analizadas en el epígrafe 5.2.1 de este capítulo.

La comparación de los tres algoritmos se ha efectuado a partir de los cuatro meses en los que se concentra la precipitación, junio, julio, agosto y septiembre, dejando de lado los meses más secos.

Las siete localizaciones estudiadas muestran un incremento de la precipitación en los 30 años analizados, aunque dicho incremento no es de la misma magnitud en todos los puntos. Los

puntos situados más al oeste muestran un aumento en la precipitación más acusado que los situados al este.

Las localizaciones en las que se observa un incremento más acusado son Diourbel (Senegal), Ouahigouya (Burkina Faso) y Natitingou (Benín). Y las que muestran menos incremento son Kita (Malí), Tahoua y Maradi (Níger). En la localización de Kiffa (Mauritania) no se observa ningún tipo de tendencia de la precipitación.



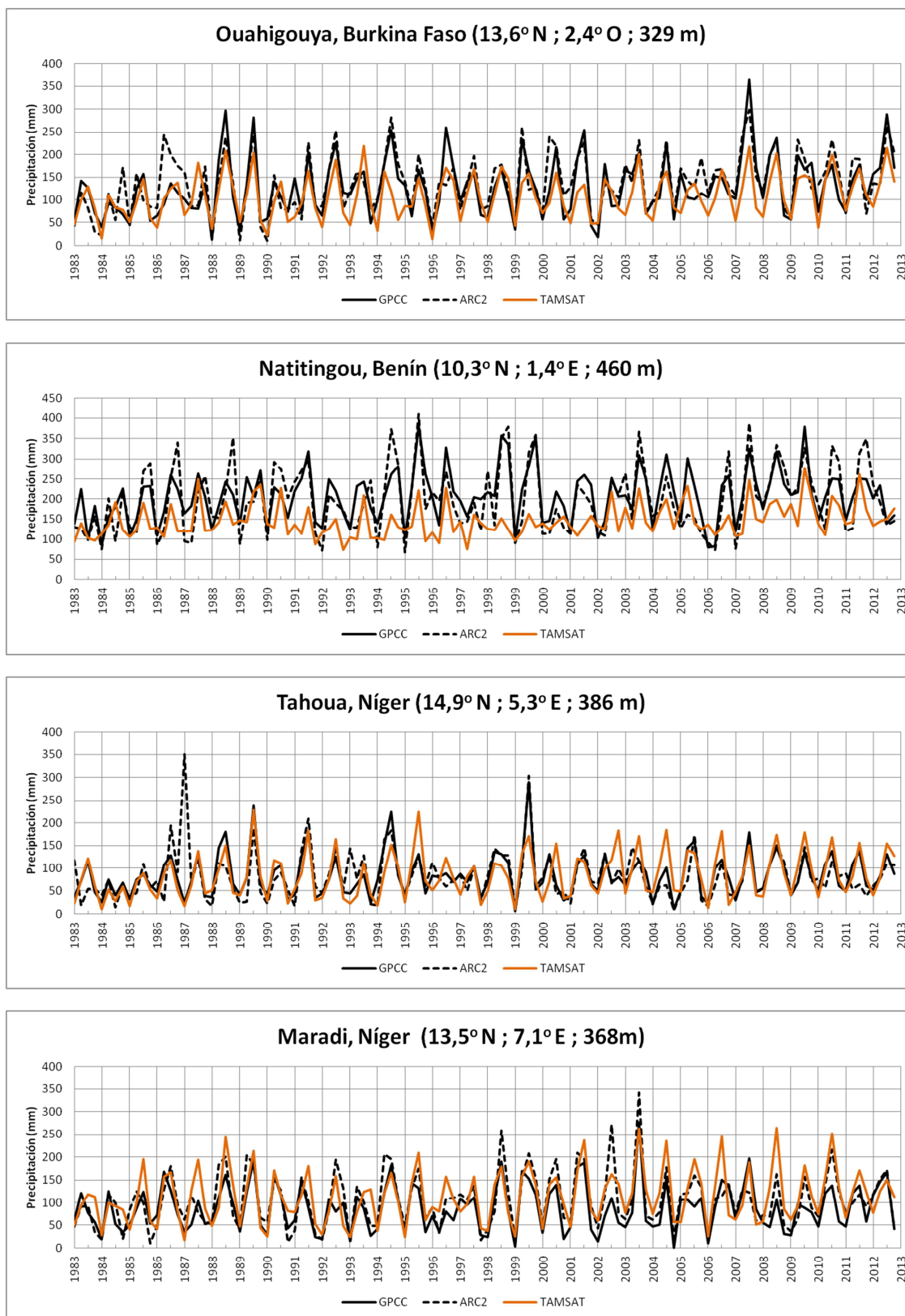


Figura 5.36. Precipitación GPCC, ARC2 y TAMSAT de junio a septiembre de 1983 a 2012 para las siete localizaciones seleccionadas.

Los picos máximos y mínimos anuales coinciden en el año por los tres algoritmos en todas las localizaciones. Menos en Natitingou (Benín), donde las series TAMSAT tienen un comportamiento errático respecto a GPCC y ARC2.

En casi todas las estaciones, la mejor relación entre los datos se produce entre GPCC y ARC2, posiblemente porque los datos ARC2 están calibrados con las estaciones meteorológicas que forman parte de GPCC. En Kita (Mali) y Tahoua (Níger) no sucede de esta manera, la mejor correlación es entre GPCC y TAMSAT. Las diferencias mayores, en todas las localizaciones, se producen entre los valores ARC2 y TAMSAT.

5.4.4 Regresión lineal

En este epígrafe se ha calculado el coeficiente de determinación entre la precipitación mensual GPCC y las estimaciones de precipitación ARC2 y TAMSAT. La variable independiente ha sido GPCC y la dependiente ARC2 y TAMSAT. Los meses que han servido para el cálculo son los de la época húmeda, de junio a septiembre, de 1983 a 2012, 120 meses en total.

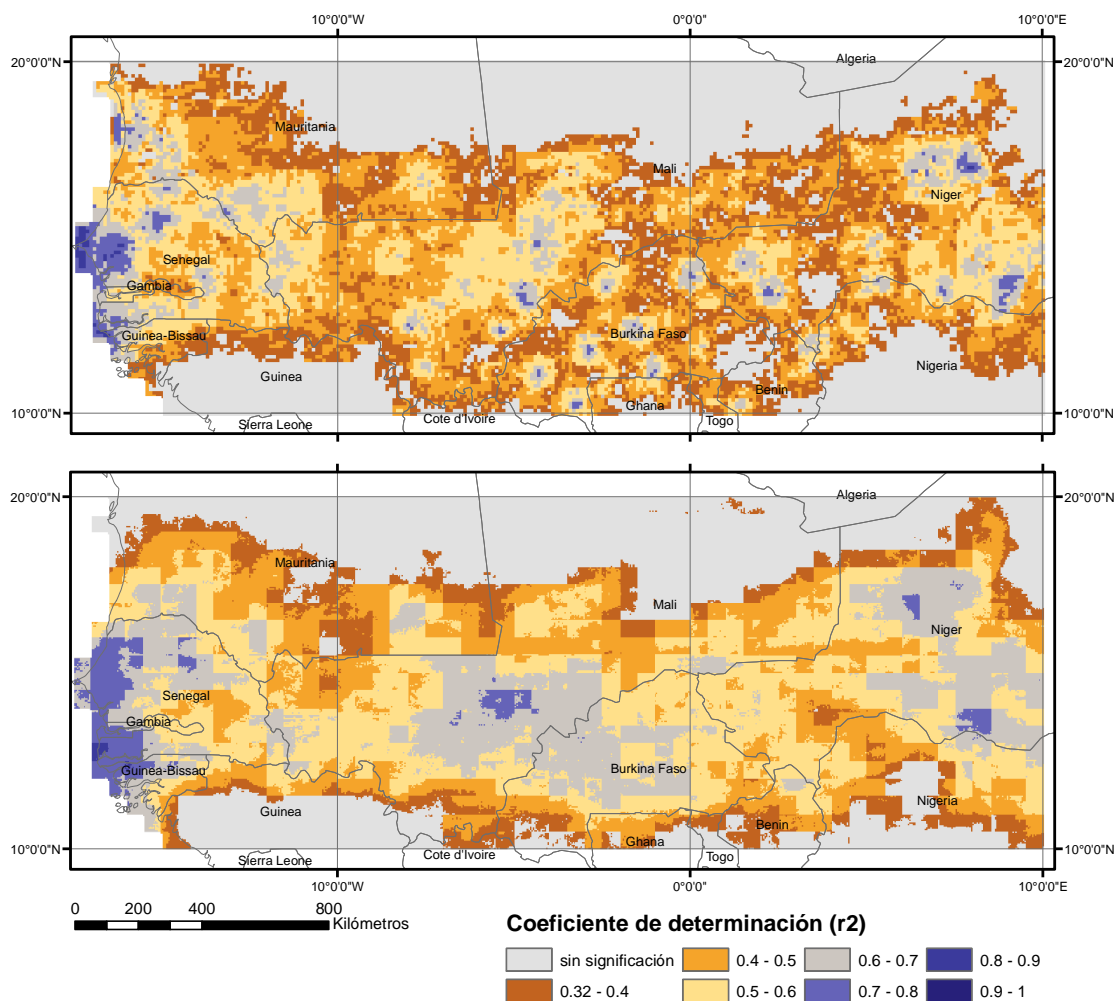


Figura 5.37. Coeficiente de determinación (r^2) entre ARC2 y GPCC (arriba) y entre TAMSAT y GPCC (abajo).

Existe una buena coherencia entre los valores GPCC y ARC2 y entre GPCC y TAMSAT. Las zonas donde el coeficiente de determinación es más elevado corresponden a la costa de Senegal y a algunos puntos en latitudes intermedias, principalmente en Malí y Burkina Faso (Figura 5.37).

5.5 Conclusiones

En este capítulo se han comparado seis conjuntos de datos que proporcionan estimaciones de precipitación medidas por satélite, ARC2, TAMSAT, RFE2, TRMM 3B42 y GPCP-1dd, respecto a un conjunto que se ha denominado de validación, GPCC, y que ha sido elaborado a partir de datos de estaciones meteorológicas terrestres en el Sahel.

Se ha observado la gran variabilidad pluviométrica a lo largo de todo el siglo pasado a través de los datos históricos de las estaciones meteorológicas que han servido como referencia para verificar los datos de validación. En todas las estaciones se observa una disminución de la precipitación a partir de la década de 1970, y el mínimo histórico en los años 1982, 1983 y 1984. A partir de la década de 1990 la precipitación se ha recuperado, aunque no de forma homogénea ni ha llegado a los estadios previos a las grandes sequías.

Se ha confirmado que la serie temporal GPCC, obtenida a partir de datos procedentes de estaciones meteorológicas, es correcta para validar las estimaciones de precipitación obtenidas por satélite, aunque uno de los principales problemas es la discontinuidad de los datos de las estaciones meteorológicas existentes en la zona.

A partir del análisis realizado para las estimaciones de precipitación entre los años 2001 y 2012 se puede concluir que los datos TRMM 3B42, ARC2 y RFE2 han demostrado una buena correspondencia respecto a los datos de referencia, y que pueden reproducir satisfactoriamente las características del régimen de lluvias; por lo tanto, pueden ser utilizados para estudiar la dinámica de la precipitación en un futuro. Estos resultados confirman las conclusiones de trabajos previos (Gosset et al., 2013; Jobard et al., 2011; Roca et al., 2010).

En este estudio se ha evidenciado un aumento de la precipitación en el Sahel en el periodo de tiempo comprendido entre 1983 y 2012. El aumento de la precipitación no es homogéneo en todos los meses de la época de lluvias, sino que se concentra, principalmente, durante el mes de agosto. También, se ha observado que el aumento de la precipitación es superior en los últimos quince años que en los primeros.

A pesar de todo, queda un gran número de incógnitas sobre el comportamiento futuro de la precipitación en el Sahel por resolver.

CAPÍTULO 6 Análisis de los datos de vegetación

6.1 Introducción

La observación de la evolución de la vegetación durante un largo periodo de tiempo tiene un papel muy importante en el análisis de la biosfera y ha permitido cuantificar las variaciones intra e interanuales de la misma relacionándolas con el cambio climático (Giannini et al., 2013; Giannini, 2010; Huber, 2011; Kaspersen et al., 2011). La forma más habitual de estudiar la vegetación a nivel global es a través de imágenes de satélite, que proporcionan una buena resolución espacial, temporal y espectral. La combinación entre las bandas del rojo y el infrarrojo cercano permiten estimar la cantidad, la calidad y el desarrollo de la vegetación a través de los denominados índices de vegetación. El más habitual en el análisis de tendencia es el índice de vegetación de diferencia normalizada, conocido como NDVI por sus siglas en inglés.

Varios trabajos han constatado una tendencia positiva en el crecimiento de la vegetación en el hemisferio norte a partir de la década de 1980 (Bi et al., 2013; Eastman et al., 2013; Fensholt et al., 2009; Mueller et al., 2014), que contrarresta la tendencia negativa que otros trabajos han detectado en el hemisferio sur, principalmente en áreas con vegetación muy densa y clima húmedo (de Jong et al., 2011; Samanta et al., 2010, 2012); así que cuando se estudia la tendencia global se obtiene como resultado una reducción neta (Zhao y Running, 2010), que algunos autores cuestionan (Medlyn, 2011). Sin embargo, estas tendencias no son significativas en grandes extensiones y tampoco en el tiempo. Por ejemplo, Mueller et al. (2014) explican el 35 % de la variabilidad en la tendencia del NDVI sólo por la densidad de población, hecho que reafirma su hipótesis de que el aumento de vegetación en Europa es debido a causas principalmente antropogénicas. Por todas estas razones, es necesario entender mejor la dinámica de la vegetación global.

La serie histórica más larga del NDVI que permite estudiar la tendencia temporal de la vegetación a nivel global procede del sensor AVHRR instalado en los satélites NOAA y se remonta a la década de 1980. Estos sensores no estaban, inicialmente, pensados para monitorizar la vegetación y no se optimizó su uso debido a consideraciones sobre la continuidad de los datos para los que fueron inicialmente diseñados (Cracknell, 2001). En

consecuencia, hay varios aspectos del diseño del sensor AVHRR que no lo hacen del todo ideal para estudiar las tendencias temporales de la vegetación. Los principales problemas del sensor y que afectan a la calidad del NDVI son la degradación de la calibración una vez puesto en órbita el satélite, las variaciones estacionales en la geometría de visualización (definida como función de distribución de reflectancia bidireccional, BRDF por sus siglas en inglés), combinado con la deriva en la hora de paso del satélite (Fensholt y Proud, 2012; Tucker et al., 2005). A todas estas cuestiones se añade el diseño espectral del sensor (número de bandas espectrales y ancho de la longitud de onda de las mismas), que ha ido variando ligeramente en cada satélite NOAA que se ha lanzado y que no permite aplicar una corrección atmosférica precisa para delimitar los efectos de absorción y dispersión de los componentes atmosféricos como el vapor de agua y los aerosoles, factores que afectan directamente la calidad de los datos del NDVI.

En las últimas dos décadas se han puesto en órbita otros sensores con capacidad para medir la dinámica de la vegetación y obtener valores del NDVI. En concreto, en abril de 1998 se lanzó el sensor VEGETATION embarcado en el satélite SPOT y desde marzo de 2000 está operativo el sensor MODIS en los satélites TERRA y AQUA.

El NDVI se obtiene a partir de las bandas espectrales del rojo y del infrarrojo cercano (IRC); no obstante, cada sensor que ha servido para la elaboración de los valores del NDVI utilizados en esta tesis tiene anchos diferentes en las bandas implicadas y, por lo tanto, diferente sensibilidad en la medida de la vegetación. El rango óptimo para discriminar la vegetación en la banda del rojo se sitúa en los 660 y 680 nm y en la banda del IRC entre 840 y 880 nm (Galvao et al., 2000; Scheftic et al., 2014). La banda del IRC tiene dos regiones vecinas muy sensibles, una entre 820-830 nm y la otra entre 900-980 nm, en las que se obtienen picos significativos de absorción de vapor de agua en la atmósfera que pueden reducir significativamente la señal de la banda reflejada por la vegetación y reducir, de este modo, el valor del NDVI (Galvao et al., 2000).

El sensor AVHRR contiene bandas espectrales bastante amplias que limitan la calidad de los valores del NDVI. La banda roja está situada en el rango de 580 a 680 nm y la banda IRC entre 730 y 980 nm. Esta última banda es en la que se producen estimaciones del NDVI de menor precisión (Scheftic et al., 2014).

Las bandas del sensor SPOT-VGT son más estrechas en comparación con las del AVHRR, pero aun así continúan teniendo algún inconveniente. La banda roja (610-680 nm) es más sensible al contenido de clorofila en la vegetación, pero la banda IRC (780-890 nm) sigue estando muy influida por la absorción de vapor de agua en la atmósfera (Maisongrande et al., 2004).

El sensor MODIS tiene la mejor resolución espectral de los tres sensores estudiados y se ha diseñado específicamente para monitorizar la vegetación; la banda roja está situada entre 620 y 670 nm y la banda IRC entre 840 y 880 nm. Además, contiene bandas espectrales que permiten medir tanto el vapor de agua como los aerosoles (Huete et al., 2002).

Con los valores originales del NDVI del sensor AVHRR se han generado varias versiones de los mismos, que han intentado solucionar algunos de los problemas comentados anteriormente. La más reciente es la producida por el grupo Global Inventory Modeling and Mapping Studies (GIMMS, por sus siglas en inglés) del Centro Espacial Goddard de la NASA. Estos datos han sido actualizados, versión GIMMS3g, y cubren el periodo de tiempo comprendido entre 1981 y 2012. El esquema de corrección (Pinzon y Tucker, 2014) implica que los datos son dinámicos y se tienen que recalcular cada vez que se añaden años posteriores al periodo inicial. Esta nueva versión corrige la diferencia en la hora de paso de cada uno de los satélites NOAA, así como la deriva de la órbita, y limpia de nubes y aerosoles atmosféricos las celdas de las imágenes.

Los sensores diseñados más recientemente con objetivo de monitorizar la vegetación incorporan herramientas para determinar la calidad de las imágenes capturadas. El sensor SPOT añade un archivo sobre el estado de las celdas que marca aquellas que contienen nubes, sombras, nieve, hielo o que simplemente no contienen datos por errores en la captura. Los datos MODIS añaden información sobre la presencia/ausencia de aerosoles para cada píxel de la escena, además de indicar las celdas que contienen nubes, sombras, nieve o hielo.

Con estas mejoras en la calidad de la información capturada por los sensores SPOT-VGT y MODIS se puede estudiar el comportamiento de los valores del NDVI GIMMS3g comparándolos entre sí a lo largo de un periodo de tiempo en común, en concreto del año 2000 al 2012. Esto nos permitirá determinar la validez de los datos GIMMS3g con anterioridad al año 2000 y analizar el comportamiento de la vegetación en el Sahel en los últimos 31 años.

El objetivo de este capítulo se centra en responder a las siguientes cuestiones:

- ¿Son coherentes los datos del NDVI AVHRR GIMMS3g en comparación con los obtenidos por los sensores SPOT-VGT y MODIS?
- ¿Existen tendencias significativas del NDVI GIMMS3g entre 1981 y 2012? ¿Estas tendencias ocurren por igual en todo el Sahel y son constantes en el tiempo?
- ¿Se han producido cambios en el comportamiento intraanual en el periodo comprendido entre 1981 y 2012?
- ¿Se puede confiar en los datos AVHRR GIMMS3g para analizar lo que ha sucedido en el Sahel en los últimos 31 años?

El análisis tanto de la comparación entre sensores como de la evolución de la vegetación entre 1981 y 2012 se ha limitado a las zonas en las que existe vegetación (aunque sólo se mantenga una parte del año) según el mapa de coberturas global [GLC-share, por sus siglas en inglés (Latham et al., 2014)], ya que el NDVI no es independiente del tipo de cubierta sobre la cual se estudie.

El capítulo se ha dividido en cuatro epígrafes, en el primero se describe el pre-procesado que se ha realizado con los tres conjuntos de datos del NDVI; en el segundo se comparan los tres conjuntos de valores del NDVI en el periodo de tiempo en el que coinciden; en el tercero se analiza la tendencia de los valores AVHRR GIMMS3g en los 31 años de datos, y en el último epígrafe se recogen las conclusiones observadas.

6.2 Preprocesado

Los tres conjuntos de datos que se analizan en este capítulo tienen, prácticamente, la misma resolución espacial, pero diferente resolución temporal y distintas formas de especificar y mostrar la calidad de los valores contenidos en las celdas. Para ello, se han adaptado las resoluciones: la espacial a 1 km y la temporal a un mes, pero previamente se han enmascarado todas aquellas celdas que contenían nubes, sombras o en las que el nivel de aerosoles era elevado en el momento de la captura de la imagen.

Los parámetros de calidad o las correcciones previas de cada uno de los productos no son iguales, mientras que los datos AVHRR y SPOT_VEGETATION indican aquellas celdas que contienen nieve, nubes o simplemente que no contienen datos, los datos Modis van un poco más allá e incorporan parámetros sobre el propio procesado y la cantidad de aerosoles en la atmosfera en el momento de tomar la imagen.

El criterio de agrupación utilizado para pasar a resolución temporal de un mes es el del valor máximo de la celda en el periodo de tiempo, con lo cual se limita la influencia de aerosoles y se reduce aún más la contaminación por nubes (Holben, 1986).

6.2.1 AVRHH GIMMS3g

Uno de los cambios que presenta la nueva versión del NDVI AVHRR GIMMS3g es una corrección aplicando métodos bayesianos que han permitido mejorar la coherencia espacial y temporal, además de corregir los efectos de la deriva orbital, las nubes y los aerosoles atmosféricos (Pinzon y Tucker, 2014).

Los datos van desde el mes de julio de 1981 hasta diciembre de 2012. El análisis en la dinámica temporal se ha realizado de enero de 1982 a diciembre de 2012, 31 años en total, 744 imágenes quincenales; los datos correspondientes a 1981 se han descartado puesto que no se tenían los del año completo.

Los datos originales tienen una resolución temporal bimensual y espacial de 1/12°. El nombre del archivo de descarga indica el número de satélite NOAA del que proceden los datos.

El formato de los datos se ha transformado de binario a geotif mediante la elaboración de una rutina en Rstudio. El rango de los valores está comprendido entre -10.000 y 10.000, y las celdas que contienen agua se consideren con valor -10.000 mientras que las celdas sin datos se consideran con valor -5.000.

Además, cada una de las celdas de la imagen incorpora indicadores de la calidad que se puede extraer de la imagen aplicando sobre cada celda la fórmula:

$$\text{IndicadorCalidad} = \text{ndvi3g} - \text{floor}(\text{ndvi3g}/10)*10 + 1;$$

Donde ndvi3g es el dato original proporcionado por el grupo GIMMS para un píxel, y floor(ndvi3g/10), el resultado de aplicar la función floor al mismo píxel partido por 10.

El resultado de aplicar la fórmula devuelve valores comprendidos en el rango de 1 a 7 (la Figura 6.1 es un ejemplo de indicador de la calidad de los datos durante los meses de agosto de 2002 y 2005).

Indicador calidad = 1: calidad correcta.

Indicador calidad = 2: calidad correcta.

Indicador calidad = 3: dato del NDVI obtenido por interpolación spline.

Indicador calidad = 4: dato del NDVI obtenido por interpolación spline, posibilidad de nieve.

Indicador calidad = 5: dato del NDVI obtenido como promedio estacional.

Indicador calidad = 6: dato del NDVI obtenido como promedio estacional, posibilidad de nieve.

Indicador calidad = 7: sin datos.

Para cada celda que no ha pasado el criterio de calidad, se busca el valor de la misma celda en la imagen anterior y en la posterior, se calcula el promedio siempre y cuando existan los dos valores y se sustituye por este valor; de esta forma evitamos los vacíos causados por la aplicación del criterio de calidad.

Una vez aplicados los criterios de calidad y el filtro a los datos bimensuales/quincenales se ha modificado la resolución temporal a mensual aplicando el criterio de valor máximo de las celdas

agregadas. Este criterio permite eliminar celdas residuales que no se han podido excluir en las correcciones efectuadas por GIMMS.

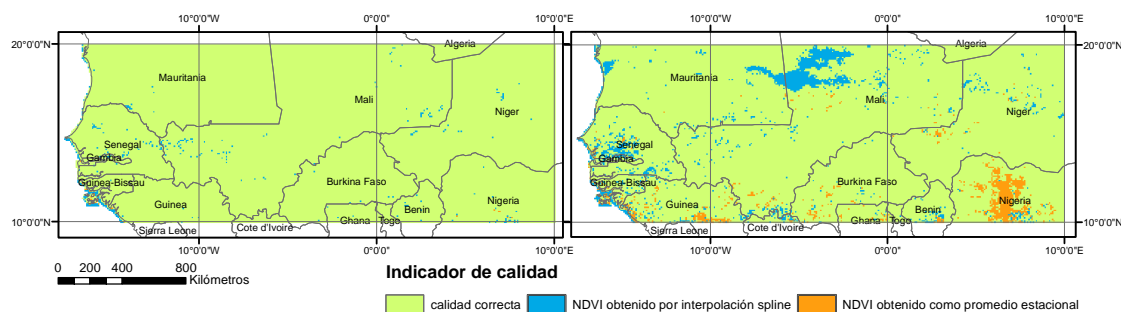


Figura 6.1. Indicadores de calidad AVHRR GIMMS3g para la primera quincena del mes de agosto de 2002 (imagen izquierda) y la primera quincena del mes de agosto de 2005 (imagen derecha).

Posteriormente, se ha transformado la resolución espacial para igualarla a la resolución espacial de los datos del NDVI SPOT-VGT y MOD13A2; con ello no se inventan nuevos valores del NDVI, simplemente se divide la celda original de mayor dimensión. Para finalizar con el pre-procesado, se ha recortado la imagen a la medida de la zona de estudio.

6.2.2 Spot-Vegetation

Los valores del NDVI SPOT-VGT utilizados en esta tesis corresponden al producto VGT-S10 y son la síntesis de diez días que se ha realizado eligiendo el mejor valor de reflectancia en la elaboración del NDVI. Este producto proporciona datos de las cuatro bandas espectrales y del NDVI y datos auxiliares con los parámetros de adquisición de la imagen.

El sensor VEGETATION ofrece tres archivos para el mes desde abril de 1998 con una resolución espacial de 1 km.

Los archivos descargados se han transformado de binarios a geotif gracias a un programa que distribuye gratuitamente VITO.

El criterio de calidad de los datos SPOT-VGT consiste en un archivo adjunto a cada una de las décadas denominado «status map», que permite enmascarar las celdas que contienen nubes, nieve, agua o aquellas en las que por un error del sensor no se ha captado información. Los valores byte de la imagen se han adaptado al rango de 0 a 250 para poder incluir en el intervalo de 251 a 255 las celdas enmascaradas.

Posteriormente, se ha aplicado el filtro (explicado en el apartado anterior), se ha efectuado la agregación a imágenes mensuales con el criterio de máximo valor y se ha terminado el pre-proceso recortando la imagen a la medida de la zona de estudio.

Los errores localizados del sensor se sitúan en la zona de desierto, en lugares que no son significativos para el estudio.

6.2.3 MODIS MOD13A2

Una de las características que hace interesante todos los productos MODIS son los archivos anexados que indican la calidad de los mismos mostrando varios parámetros que hay que tener en cuenta al analizar y procesar los valores del NDVI.

El producto MOD13A2 tiene una resolución espacial de 1 km y una resolución temporal de 16 días y se ofrece en «tiles» para la descarga. A nuestra zona de estudio le corresponden 3 archivos (h16 v07; h17 v07; h18 v07) en formato HDF que contienen 12 capas. Las necesarias en el análisis son:

- 1 km 16 days NDVI
- 1 km 16 days VI Quality

Los criterios de calidad que debían cumplirse del archivo 1 km 16 days VI Quality y que han sido aplicados a 1 km 16 days NDVI son:

- Bit 0-1 <= 01
- Bit 2-5 <= 1010
- Bit 6-7 <= 01
- Bit 8 = 0
- Bit 10 = 0
- Bit 15 = 0

Todas aquellas celdas que no cumplían estos criterios han sido enmascaradas. Posteriormente, las tres «tiles» se han convertido en un mosaico y se han recortado para poder aplicar el filtro con el objetivo de intentar disminuir la fuerte presencia de celdas no válidas.

Los datos MODIS están disponibles desde mediados de febrero del 2000; para poder incluir todo el año 2000 en el estudio se ha realizado el promedio de los archivos que faltan entre los del periodo 2001-2012 (Fensholt y Proud, 2012).

6.3 Comparación del NDVI entre AVHRR GIMMS3g, SPOT-VGT y MOD13A2

Los tres valores del NDVI que se estudian en este apartado es muy probable que no coincidan entre ellos por las diferentes características espectrales. Pero es interesante observar cómo cada sensor ha recogido la dinámica de la vegetación durante el periodo de 13 años en el que han coincidido orbitando, de 2000 a 2012, para poder entender las diferencias entre ellos.

6.3.1 Análisis de tendencia temporal

Existen varias maneras de comparar series temporales que contienen una distribución espacial, una de ellas es la obtención de la tendencia en el periodo de tiempo en el que los tres conjuntos de datos coinciden, de enero de 2000 a diciembre de 2012.

En este apartado, se ha calculado la tendencia temporal Theil-Sen y su nivel de confianza mediante el test de Mann-Kendall (95 %) a partir de observaciones mensuales con los tres conjuntos del NDVI. También, se ha obtenido la desviación estándar de los meses de febrero, mayo y agosto y las anomalías de mayo a octubre con el objetivo de observar el comportamiento del NDVI en estos meses a lo largo de los 13 años para los que hay datos de tres fuentes distintas.

En estos procesos se han utilizado las celdas con un 75 % de valores válidos y se han dejado a un lado aquellas que no han pasado los criterios de calidad descritos anteriormente. Los tres conjuntos de datos han sido previamente normalizados respecto al mismo periodo de tiempo.

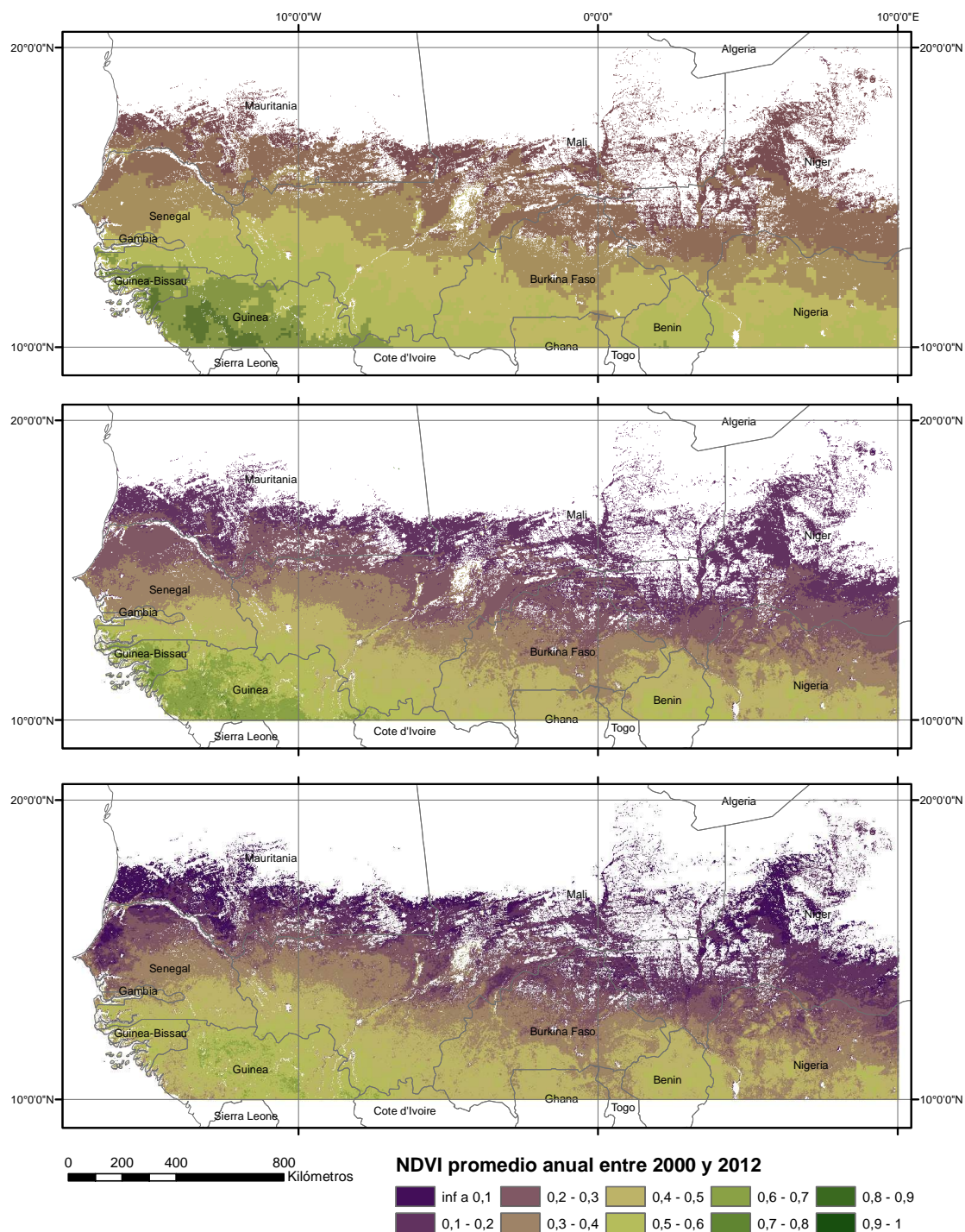


Figura 6.2. Valor del NDVI promedio entre los años 2000 y 2012. De arriba abajo: AVHRR GIMMS3g, SPOT-VGT y MOD13A2.

Antes de realizar la comparación de la tendencia temporal de cada uno de los tres conjuntos del NDVI, es interesante observar los mapas que reflejan el NDVI promedio en el periodo 2000-2012 y los perfiles temporales del comportamiento de la vegetación en ese intervalo de tiempo.

Los tres conjuntos del NDVI describen el gradiente existente entre la zona sur, donde la vegetación se mantiene prácticamente durante todo el año, y la zona norte, donde la presencia de vegetación es un fenómeno estacional. Los valores más elevados del NDVI promedio entre los años 2000 y 2012 proceden del sensor AVHRR GIMMS3g (Figura 6.2 y Figura 6.3).

En los perfiles temporales (Figura 6.3) se observa cómo los tres valores del NDVI recogen la estacionalidad entre los años 2000 y 2012. Los valores del NDVI SPOT-VGT y MOD13A2 se asemejan en los picos de máxima vegetación anual, y puede observarse que la mayor diferencia se produce en la época seca entre los datos de AVHRR GIMMS3g y SPOT. En el gráfico también se han señalado los diferentes sensores que han proporcionado los datos; mientras que el sensor MODIS no ha cambiado en todo el tiempo de análisis, sí lo han hecho el sensor AVHRR, embarcado en diferentes satélites NOAA, y el sensor VEGETATION 1 y 2, embarcados en los satélites SPOT 4 y 5 respectivamente.

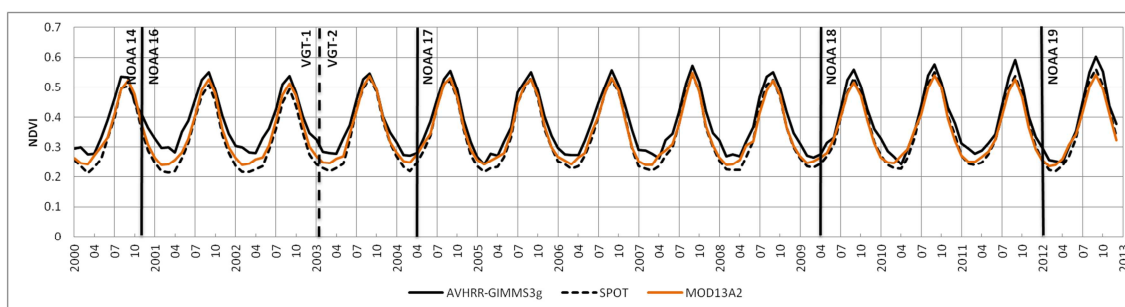


Figura 6.3. Perfil temporal de los valores promedio entre los años 2000 y 2012.

En la versión 3 de los datos AVHRR generada por GIMMS los efectos por la deriva orbital en la hora de paso de los satélites NOAA han sido corregidos (Pinzon y Tucker, 2014). Los sensores VGT-1 y VGT-2 embarcados en los satélites SPOT generan el mismo tipo de dato sin diferencias significativas, aunque a partir del año 2007 el satélite SPOT 5 empezó a sufrir cierta deriva orbital en la hora de paso del nodo descendente, que ha sido analizada por Swinnen et al. (2014), que han llegado a la conclusión que no es estadísticamente significativa y no es importante en las latitudes donde se sitúa la zona de estudio.

La tendencia temporal de cada una de las series del NDVI (Figura 6.4) muestra una distribución espacial muy diferente para cada conjunto analizado; en concreto, en las áreas donde se observa un aumento o disminución de la vegetación. La significación estadística mediante el test de Mann-Kendall en todos los análisis se ha realizado aplicando el límite del 95 % de nivel de confianza.

Los valores de AVHRR GIMMS3g son los que recogen una menor superficie con tendencia en la vegetación. El 12,61 % de la superficie tiene tendencia positiva (tonos verdes) y el 26,55 % negativa (tonos lilas); es decir, en total, sólo el 39,19 % de la superficie.

En comparación, es en los valores del NDVI SPOT-VGT donde se observa un mayor aumento de la vegetación en los 13 años que comprende el estudio. El 77,82 % del territorio es significativamente estadístico, del cual el 74,28 % es positivo (tonos verdes) y el 3,54 %, negativo (tonos lilas).

La mitad del área en los datos MOD13A2, en concreto el 50,63 %, muestra un aumento y/o disminución de la vegetación; en concreto, un 32,62 % registra un aumento del NDVI y un 17,99 %, una disminución en el periodo de tiempo analizado.

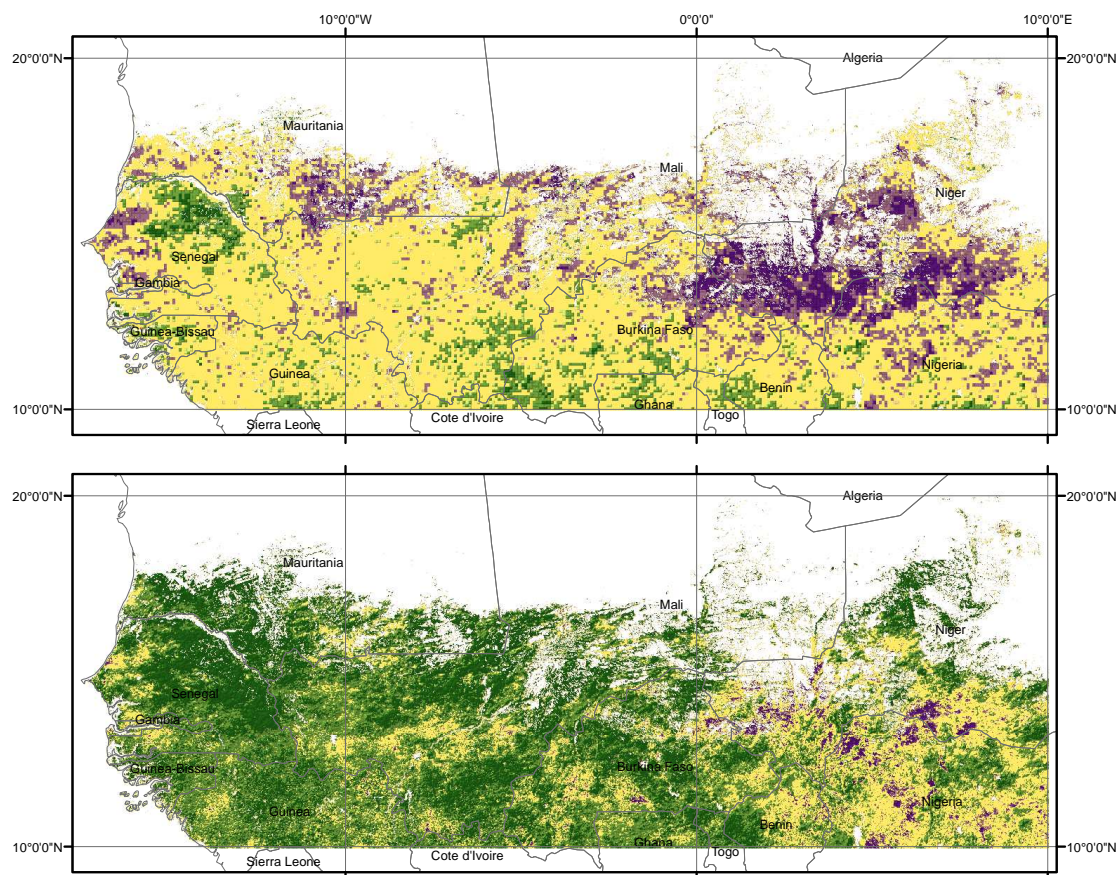
Las tendencias de los datos del NDVI correspondientes a SPOT-VGT y MOD13A2 muestran una mayor relación entre ellos que con AVHRR GIMMS3g. Por ejemplo, áreas que presentan una tendencia positiva en Senegal y Malí o bien negativa en Níger con los datos SPOT y

MOD13A2 no presentan ningún tipo de tendencia en los valores AVHRR GIMMS3g. Fensholt et al. (2009) encontraron que las discrepancias existentes entre los sensores VGT1 y VGT2 de los satélites SPOT pueden explicar las tendencias más altas en comparación con los otros datos.

Las áreas que no son estadísticamente significativas se concentran en las zonas de vegetación más densa, aunque no ocurre de forma tan evidente para los datos SPOT-VGT. Esto se puede explicar por el hecho que el NDVI tiende a saturarse con valores elevados del NDVI, que es lo que ocurre con los instrumentos AVHRR (Fensholt et al., 2009; Samanta et al., 2010, 2012).

Fensholt et al., (2009) describen una hipótesis alternativa para las diferencias en las zonas húmedas, que atribuyen a los diferentes procedimientos para enmascarar las nubes en cualquiera de los tres productos.

Otra manera de comprobar la similitud entre los datos es con la desviación estándar, que permite observar la variación del NDVI en el periodo de tiempo estudiado. Para ello se han elegido los meses de febrero, cuando la vegetación registra sus mínimos anuales e incluso desaparece completamente en algunas áreas, y septiembre, cuando se generan los picos máximos del NDVI. Los datos de los meses de mayo y agosto se han incluido en un anejo para no sobrecargar el documento.



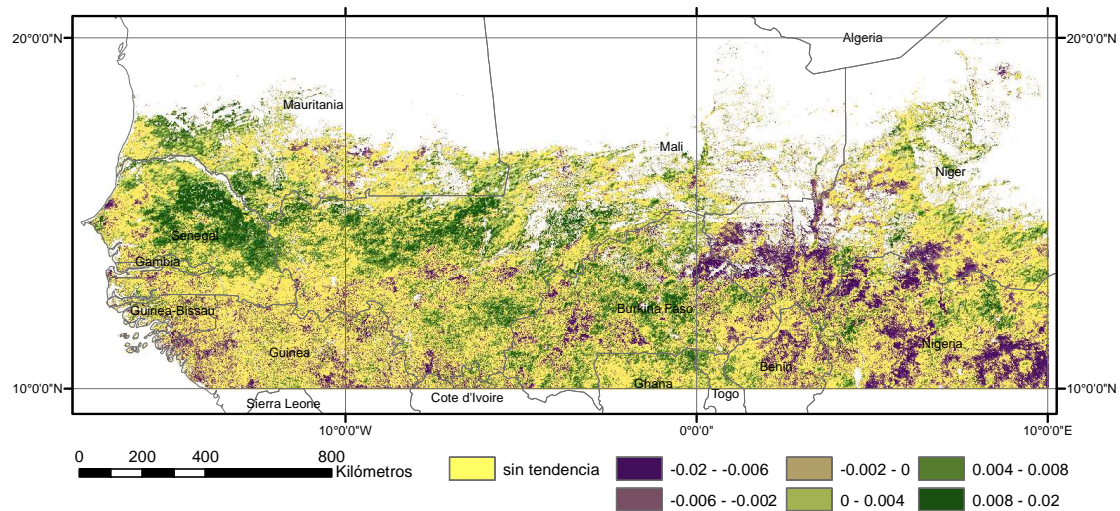


Figura 6.4. Pendiente mensual Theil-Sen en las zonas con vegetación para los datos AVHRR GIMMS3g, Spot-VGT y MOD13A2, respectivamente, de 2000 a 2012. Nivel de confianza del 95 %.

El valor promedio de la desviación estándar en el mes de febrero (Figura 6.5) es de 0,0213 para los valores AVHRR GIMMS3g, 0,0186 para SPOT-VGT y 0,0179 para MOD13A2. Los valores de SPOT y MODIS se asemejan mucho en su distribución espacial y prácticamente coinciden en el valor promedio; no ocurre lo mismo con los valores de AVHRR GIMMS3g.

Los mapas referentes al mes de septiembre (Figura 6.6) correspondientes a la desviación estándar tienen más diferencias entre sí y un valor más elevado en promedio, la cual cosa se debe a la variabilidad interanual de la vegetación durante este mes. Los valores promedio son: 0,0531, 0,0555 y 0,0537 para AVHRR GIMMS3g, SPOT-VGT y MOD13A2 respectivamente. Los tonos verdosos, que significan una desviación estándar más elevada, corresponden a zonas en las que la precipitación juega un papel muy importante en el desarrollo de la vegetación y que no siempre es constante en el tiempo tal y como se ha observado en el capítulo anterior.

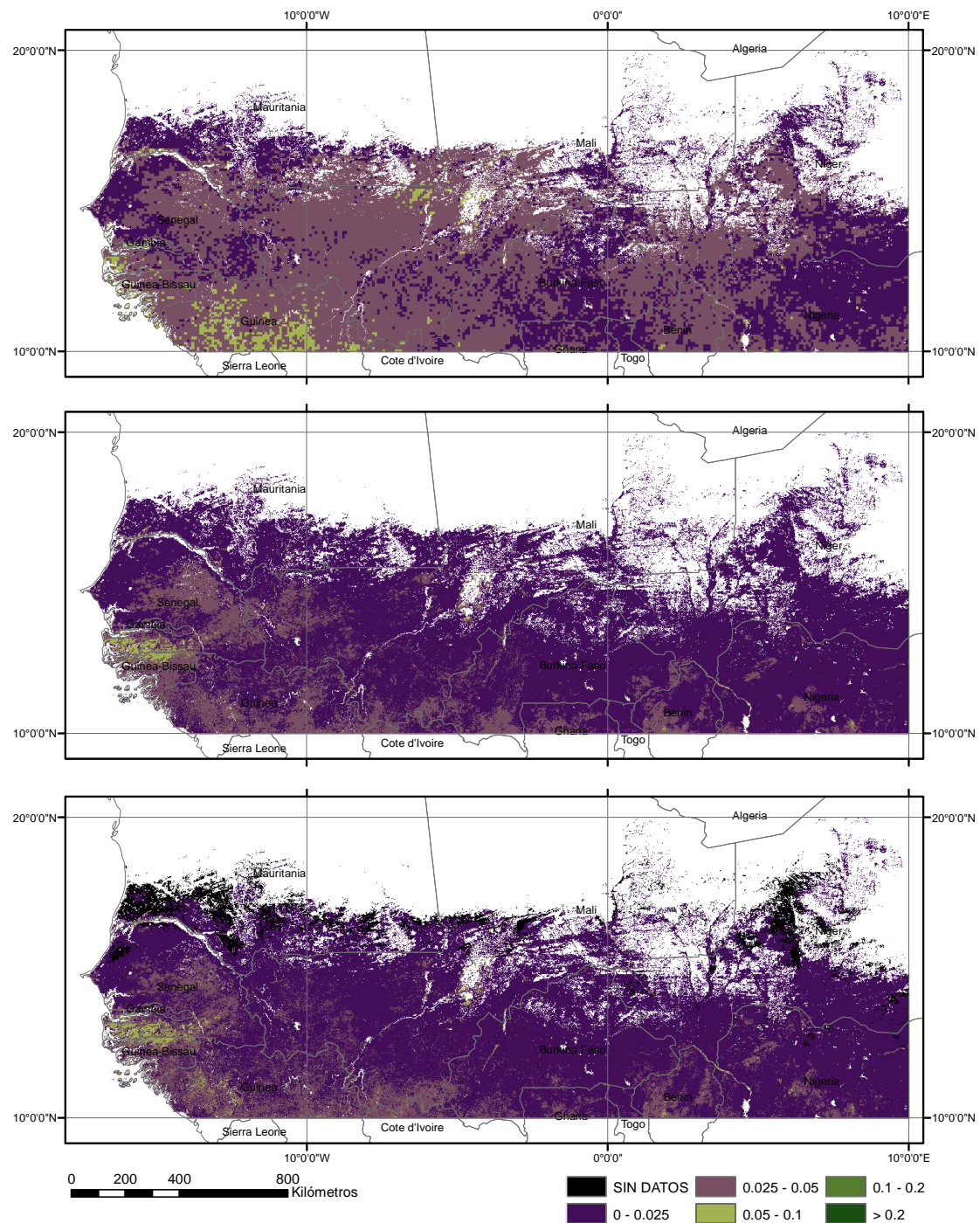


Figura 6.5. Desviación estándar del mes de febrero entre los años 2000 y 2012. De arriba abajo: AVHRR-GIMMS3g, SPOT-VGT y MOD13A2.

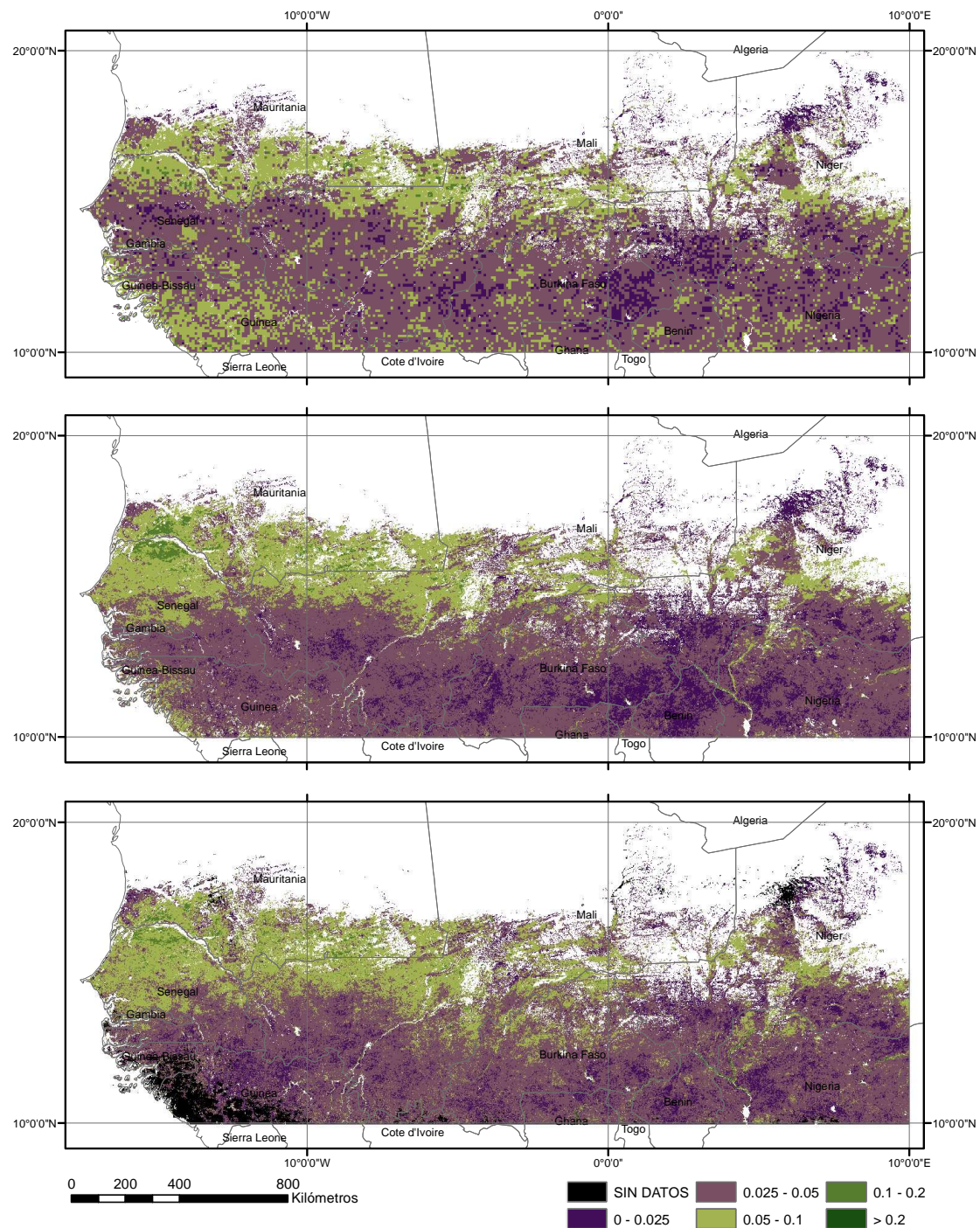


Figura 6.6. Desviación estándar del mes de septiembre entre los años 2000 y 2012. De arriba abajo: AVHRR-GIMMS3g, SPOT-VGT y MOD13A2.

Si profundizamos un poco en el comportamiento del NDVI de cada mes y lo comparamos con su propio valor a lo largo de los 13 años, pueden calcularse las anomalías estandarizadas promedio en toda el área de estudio durante los meses de mayor actividad fotosintética, de mayo a octubre (Figura 6.7). Los resultados muestran que no existe una coincidencia absoluta en los trece meses analizados y que las mayores diferencias tienen lugar en los cuatro primeros años observados y también en los meses de mayo y junio. Si se hace un simple recuento de concurrencias entre los tres conjuntos de dos en dos, se determina que los valores del NDVI SPOT-VGT y MOD13A2 coinciden en un 76 % de las veces; los de AVHRR

GIMMS3g y SPOT-VGT, en un 55 % de los casos, y finalmente, los de AVHRR y MODIS, en un 61,5 %.

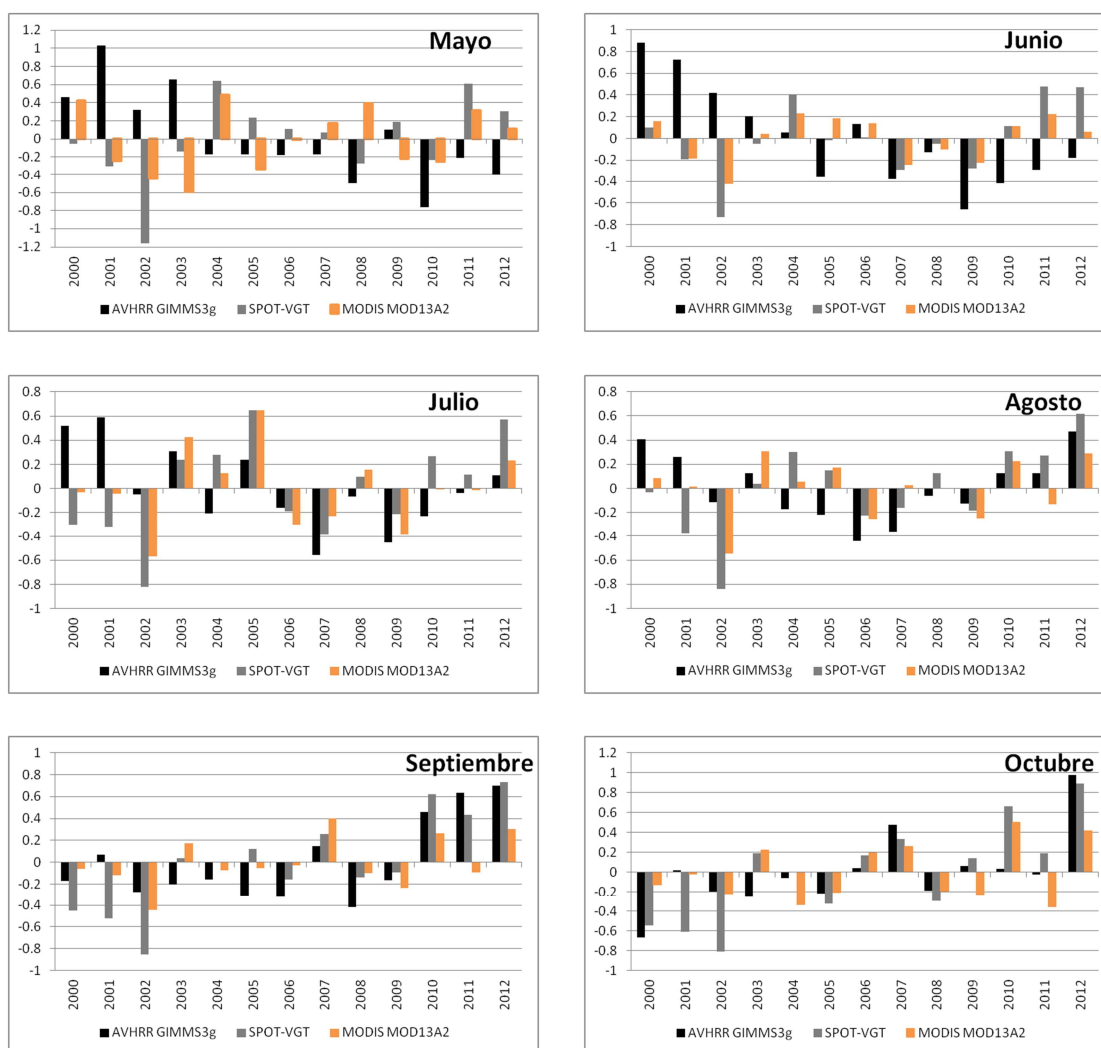


Figura 6.7. Anomalías del NDVI de mayo a octubre del periodo 2000-2012 para los tres conjuntos del NDVI analizados en el área de estudio.

6.3.2 Regresión lineal entre valores del NDVI

La comparación directa entre valores anuales de AVHRR GIMMS3g y SPOT-VGT y entre AVHRR GIMMS3g y MOD13A2 se ha realizado mediante una regresión lineal y de este modo se ha obtenido el valor de coeficiente de correlación, r , y de determinación, r^2 . En las dos regresiones calculadas los datos de AVHRR GIMMS3g se han considerado como variable dependiente y los datos de SPOT-VGT y MOD13A2 como variable independiente.

En la Figura 6.8 se muestran los resultados del coeficiente de correlación (r), que es bastante elevado en los lugares en los que existe un nivel de confianza del 95 %; el problema es que en gran parte del territorio no hay significación estadística.

Se observa más coincidencia entre los datos AVHRR y SPOT, especialmente en el norte de Senegal, sur de Mauritania, Malí y de forma más puntual en Burkina Faso, Níger y Nigeria. La superficie con significación estadística es del 42,2 %, con un valor de r promedio de 0,71.

Los valores más elevados en la correlación entre AVHRR y MOD13A2 coinciden con los de AVHRR y SPOT, aunque la superficie estadísticamente significativa es sólo del 25,5 % (prácticamente la totalidad tiene signo positivo); el valor promedio del coeficiente de correlación es de 0,69.

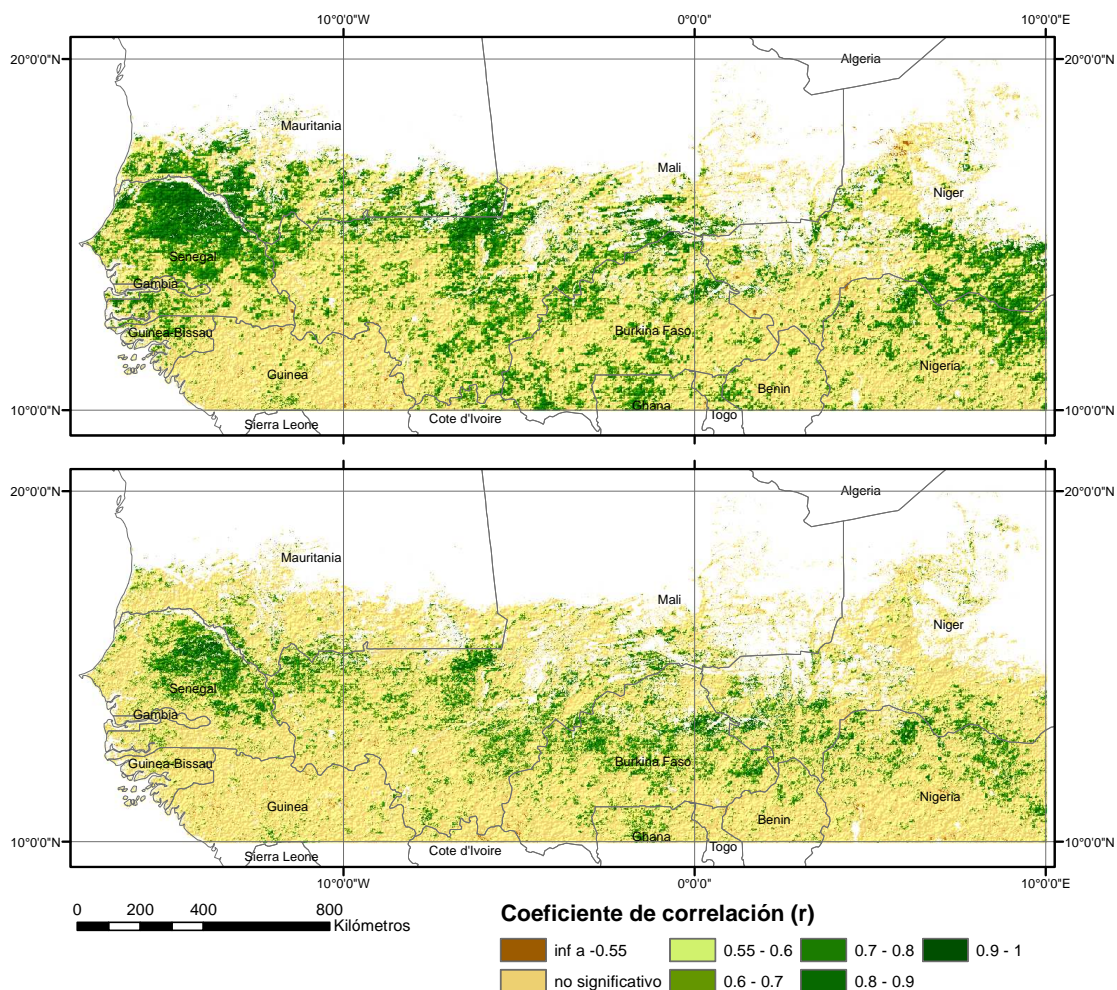


Figura 6.8. Coeficiente de correlación (r) entre AVHRR-GIMMS3g y SPOT-VGT (arriba) y entre AVHRR-GIMMS3g y MOD13A2 (abajo).

6.3.3 Influencia de las diferentes coberturas de vegetación en la tendencia

Para caracterizar las diferentes cubiertas que conforman la zona se ha elegido el mapa de coberturas GLC-share. Las clases seleccionadas son tierras de cultivo, zonas de pastura, bosques, arbustos y matorrales, y vegetación escasa (Figura 6.9). En la elaboración de los perfiles, para extraer el promedio de cada uno de los meses, se ha impuesto como criterio que cada celda contenga un mínimo del 30 % de la clase que se está definiendo. El promedio se ha efectuado de forma ponderada en cada celda.

La tipología de suelo más extensa son zonas de pastura, seguidas de tierras de cultivo, bosques, arbustos y matorrales; y la que ocupa una menor extensión corresponde a la clase vegetación escasa. En el 64,3 % del territorio coexiste algún tipo de vegetación aunque no durante todo el año, el resto del área está dominado por áreas de desierto y suelo desnudo (Tabla 6.1).

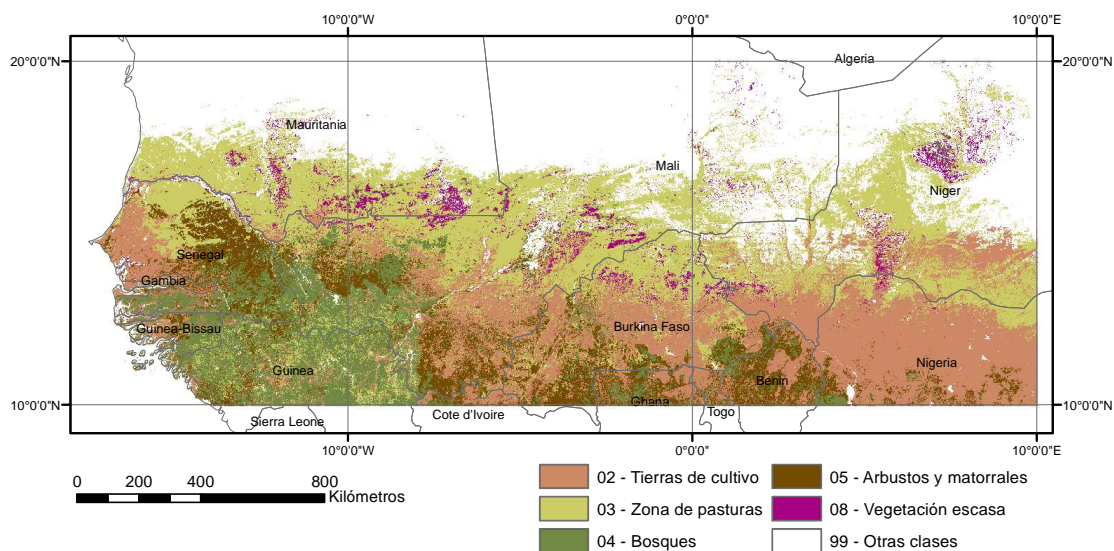


Figura 6.9. Mapa con las cubiertas del suelo seleccionadas, GLC share 2014.

La distribución de las cinco cubiertas en los países que conforman el área se muestra en la tabla siguiente.

Tabla 6.1. Tipologías de clase según la superficie y los países con superficie significativa de cada una.

Clase	Superficie (%)	Países con superficie significativa
Tierras de cultivo	20,6	Nigeria, Burkina Faso, Senegal, Malí
Zona de pastura	24,1	Mauritania, Senegal, Malí, Burkina Faso, Níger
Bosque	9,4	Guinea, Guinea Bissau, Gambia
Arbustos y matorrales	8,0	Senegal, Malí, Burkina Faso, Benín
Vegetación escasa	2,2	Mauritania, Malí, Níger
Otras clases	35,7	Mauritania, Malí, Níger

En las clases de vegetación analizadas (Figura 6.10), los tres valores del NDVI recogen de forma muy similar la estacionalidad típica de la zona con sus picos máximos y mínimos en los 13 años estudiados. También se observa una ligera tendencia positiva de la vegetación en los perfiles temporales de las cinco clases estudiadas.

Si observamos cada una de ellas con detenimiento podremos ver prácticamente en todo el periodo de tiempo y para los cinco tipos estudiados valores superiores de AVHRR GIMMS3g respecto a los valores de SPOT-VGT y MOD13A2. Los valores de NDVI SPOT-VGT y MOD13A2 tienen un comportamiento muy parecido en las tipologías tierras de cultivo, zona de pasturas, bosques y vegetación escasa, especialmente en los picos de máxima actividad de la vegetación. La diferencia más importante entre los tres valores del NDVI analizados se observa en la época seca, en el momento en el que la vegetación es escasa o nula: mientras que en ese momento del ciclo estacional los datos SPOT-VGT y MOD13A2 van casi a la par, no ocurre lo mismo con los datos AVHRR GIMMS3g.

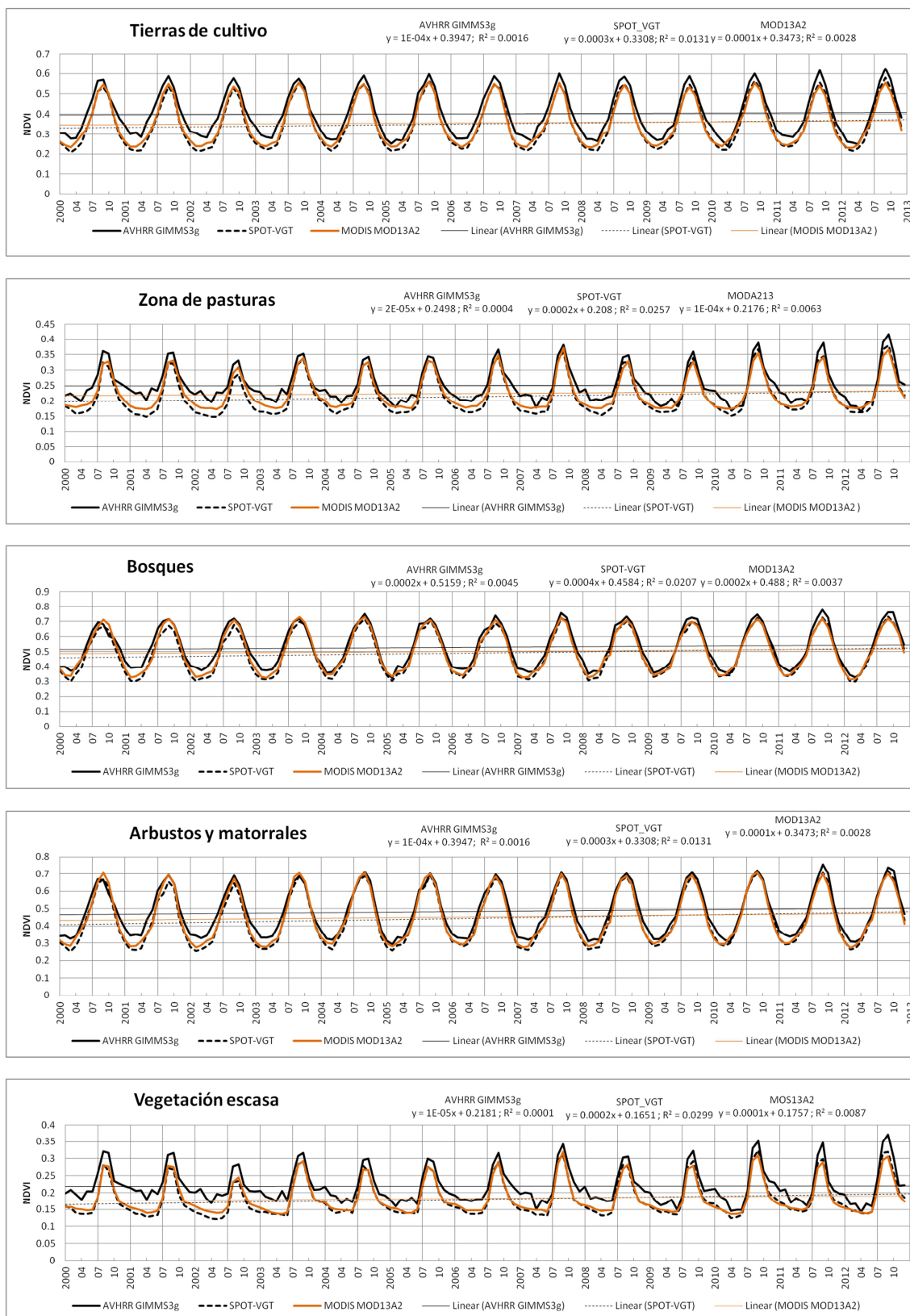
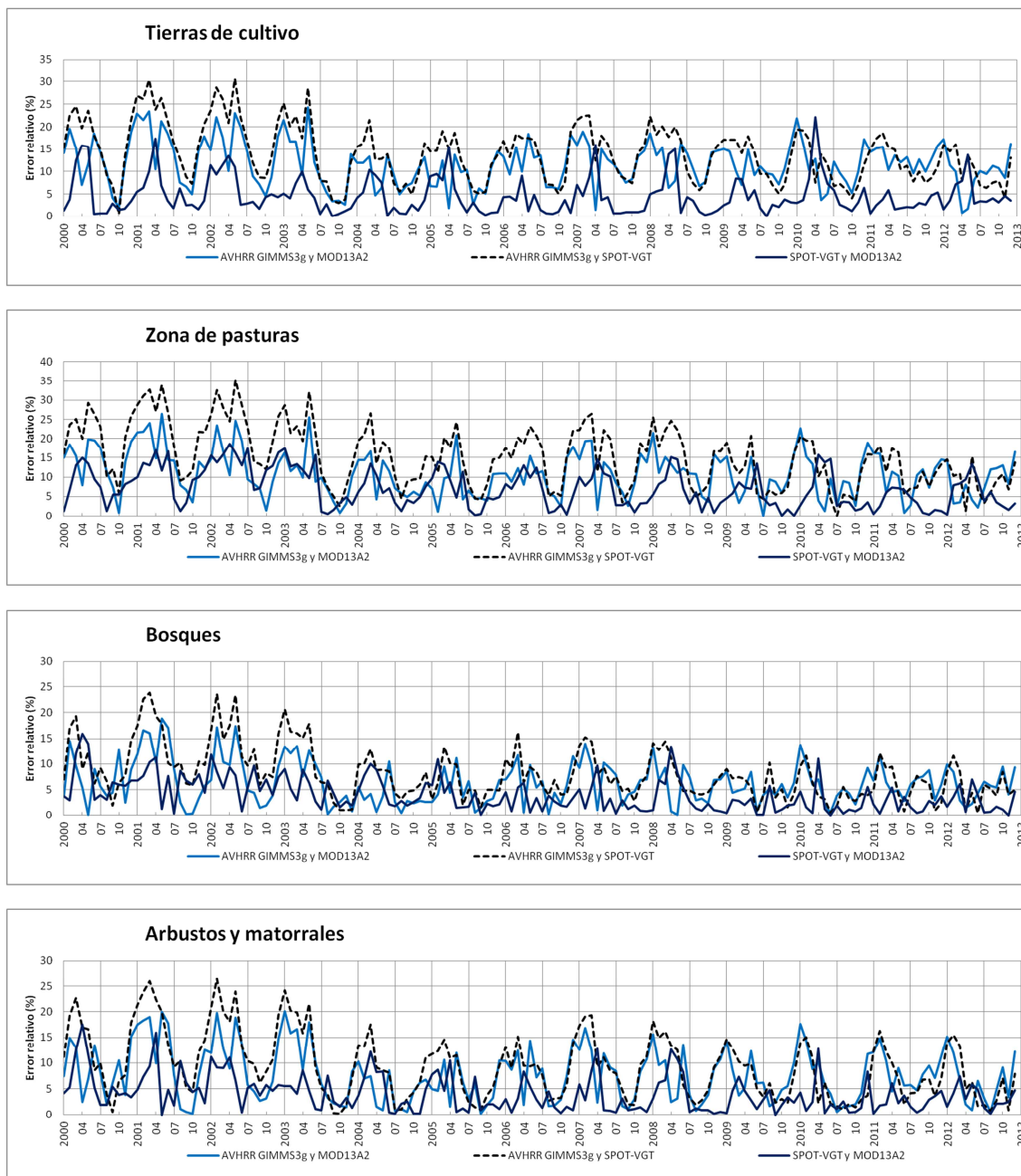


Figura 6.10. Valor del NDVI promedio y tendencia lineal en las clases: tierras de cultivo, zona de pasturas, bosques, arbustos y matorrales, y vegetación escasa.

El error relativo (Figura 6.11) es más elevado entre los valores de NDVI AVHRR GIMMS3g y SPOT-VGT, y los valores máximos del error se dan entre los años 2000 y 2003. Algo parecido ocurre en la comparación de NDVI AVHRR GIMMS3g y MOD13A2, donde los valores más

altos del error se producen en el intervalo de tiempo comprendido entre los años 2000 y 2003. Esto puede estar causado por el cambio de sensor VEGETATION 1 a VEGETATION 2 a principios del año 2003 y también por el cambio del satélite NOAA16 a NOAA17 en abril de 2004.

Las diferencias en el NDVI de SPOT-VGT y MOD13A2 son menores en casi todas las clases y se sitúa en valores que van de 0 a 15 %.



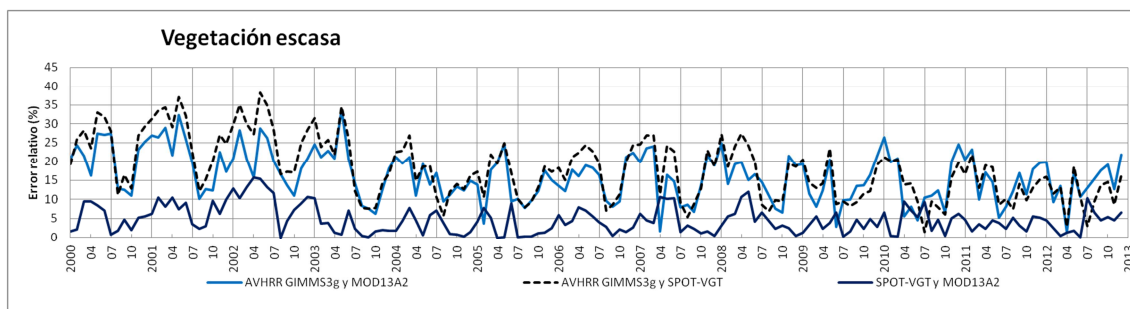


Figura 6.11. Error relativo entre los valores de AVHRR GIMMS3g/MOD13A2, AVHRR GIMMS3g/SPOT_VGT y SPOT-VGT/MOD13A2.

6.3.4 Comparación en puntos seleccionados

Los puntos seleccionados para estudiar de forma más concreta el comportamiento de la vegetación corresponden a las localizaciones de las estaciones meteorológicas analizadas en el capítulo anterior. Para comparar el perfil del NDVI con el tipo de cubierta existente en la zona se han utilizado dos mapas de cubiertas del suelo: el GLC del año 2000 producido por el JRC y el GLC-share del año 2014 confeccionado por la FAO.

El mapa de cubiertas del suelo GLC-2000 incluye 22 tipologías de suelo y tiene una resolución espacial de 1 km.

El GLC-share tiene 11 tipologías y su resolución espacial es de 1 km. Este mapa está compuesto de 11 capas; cada capa representa una cubierta donde las celdas tienen valores comprendidos de 0 a 100, que es el porcentaje de ocupación de esa cubierta en la celda.

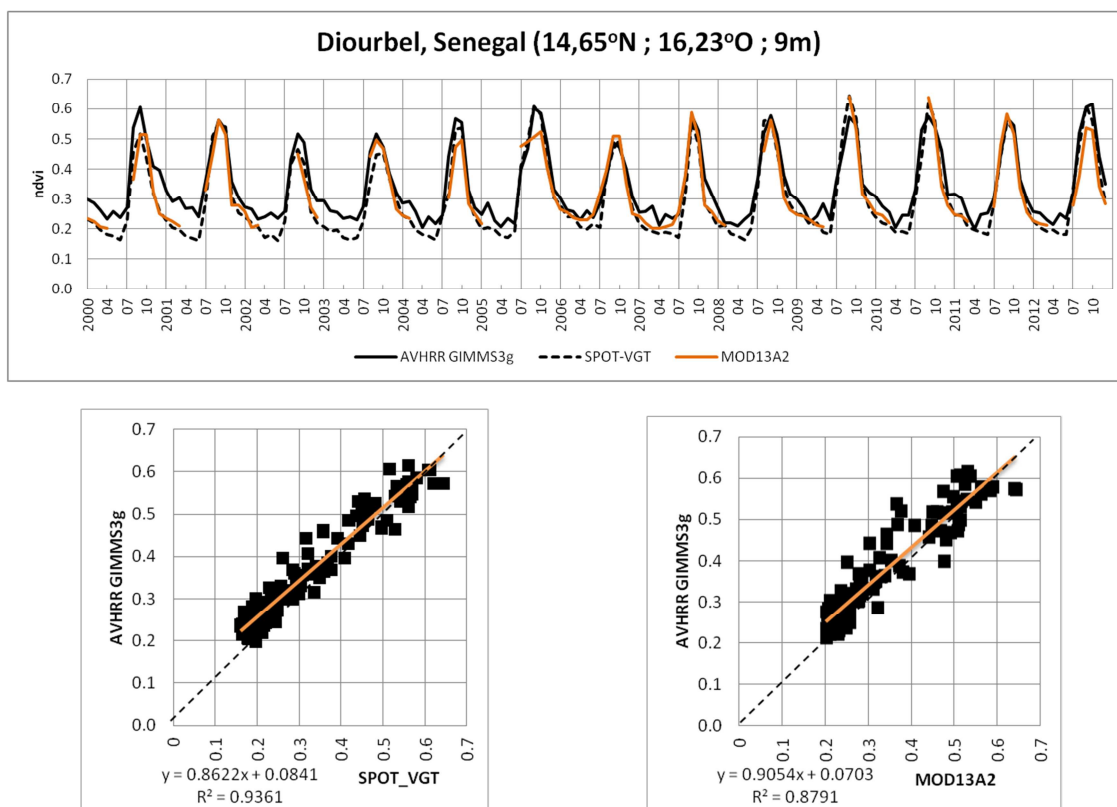


Figura 6.12. Serie temporal del NDVI para la localización de Diourbel, Senegal (arriba).

La serie temporal del NDVI para Diourbel, Senegal (Figura 6.12), está marcada por un número elevado de celdas que han sido descartadas por no cumplir criterios de calidad en la serie MODIS (a causa del elevado valor de aerosoles), lo cual no implica que sí se cumplieran los criterios en las otras series, sino que simplemente este parámetro no se contempló en el diseño de los sensores. La localización está clasificada como tierras de cultivo (96 %) y zona de pasturas (35 %) según el GLC-share del año 2014. Este mismo punto pero en el GLC del año 2000 está clasificado como mosaico de tierras de cultivo y arbustos. El comportamiento de la serie temporal se asemeja al perfil temporal realizado para la clase tierras de cultivo (Figura 6.10).

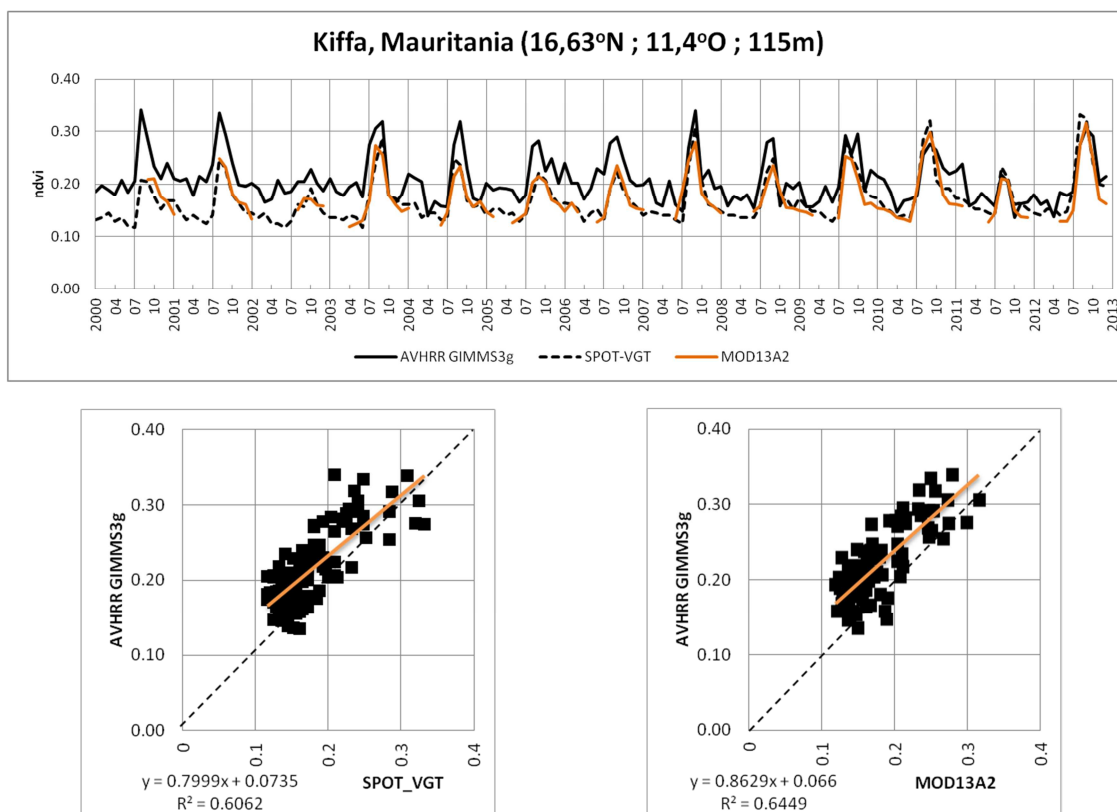


Figura 6.13. Serie temporal del NDVI para la localización de Kiffa, Mauritania.

Kiffa, en Mauritania, es la localización que está situada más al norte de todas las analizadas (Figura 6.13). La clasificación del tipo de cobertura del suelo que recibe tanto del GLC-2000 como de GLC-share del 2014 es zona de pasturas. En esta localización los valores SPOT y MODIS se asemejan bastante, si bien no ocurre lo mismo con los datos AVHRR GIMMS3g, que proporciona valores superiores del NDVI. Igual que en la estación de Diourbel, no se tiene la serie completa de valores MODIS, ya que algunos meses no pasaron el filtro de calidad a causa de los aerosoles durante los meses de la época seca. En los gráficos de dispersión se observa como los valores de AVHRR son generalmente más elevados, y los coeficientes de determinación muestran que los conjuntos no coinciden tan exactamente.

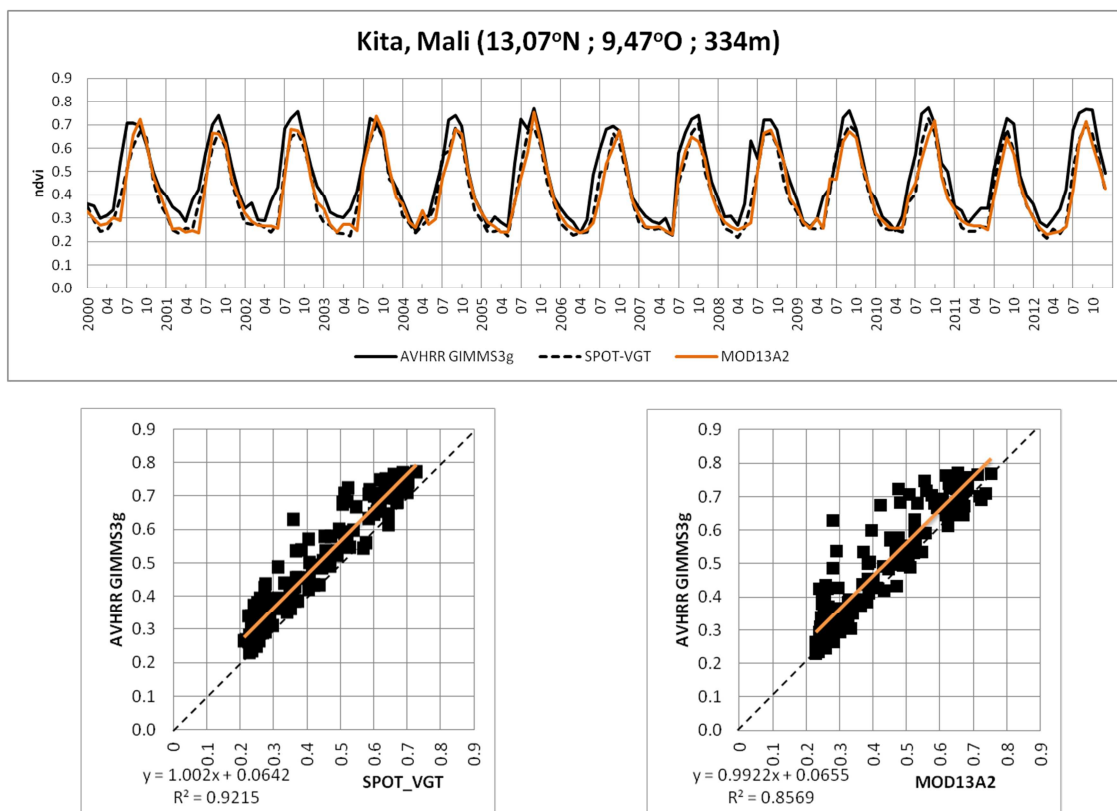
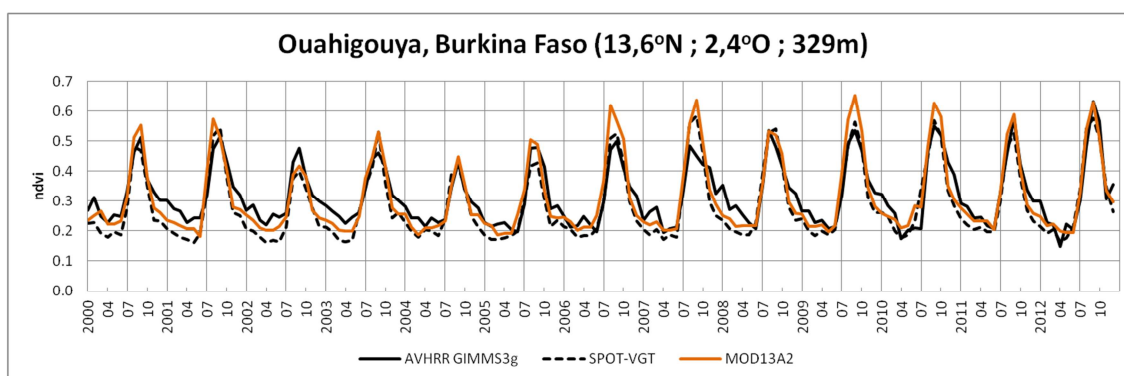


Figura 6.14. Serie temporal del NDVI para la localización de Kita, Malí.

En la localización que corresponde a Kita, Malí (Figura 6.14), los valores del NDVI de las series SPOT-VGT y MOD13A2 son muy parecidos, pero no ocurre lo mismo con los datos AVHRR GIMMS3g, que generan valores superiores. Kita, según los usos del suelo del año 2000, está clasificada como zona de cultivo y, según los usos del suelo del año 2014, un 81 % de la celda son tierras de cultivo y el 19 % restante corresponde a bosque. La recta de regresión lineal en los gráficos de dispersión tiene pendiente prácticamente igual a uno, y el coeficiente de determinación es muy elevado.



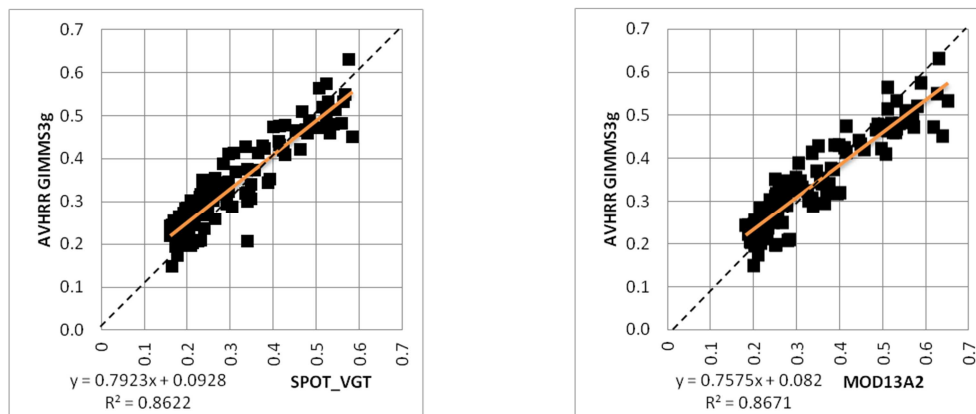


Figura 6.15. Serie temporal del NDVI para la localización de Ouahigouya, Burkina Faso.

Las clasificaciones proporcionadas por GLC-2000 y GLC-share para Ouahigouya, en Burkina Faso (Figura 6.15), no coinciden. Según el GLC-2000 está clasificada como tierra de cultivo, mientras que según el GLC-share el 21 % corresponde a zona de pastura, el 16 % a bosques, el 16 % a arbustos y matorrales y un 8 % es vegetación escasa (falta completar por parte de GLC-share el tipo de cubierta del 39 % de la superficie). A partir del año 2006 el comportamiento de la serie temporal corresponde más a tierras de cultivo; puede ser que en esta zona se cambiara el tipo de usos del suelo. Los tres conjuntos del NDVI se parecen bastante, especialmente en los últimos años. Los valores de MOD13A2 casi siempre recogen los picos máximos con un valor superior a los otros.

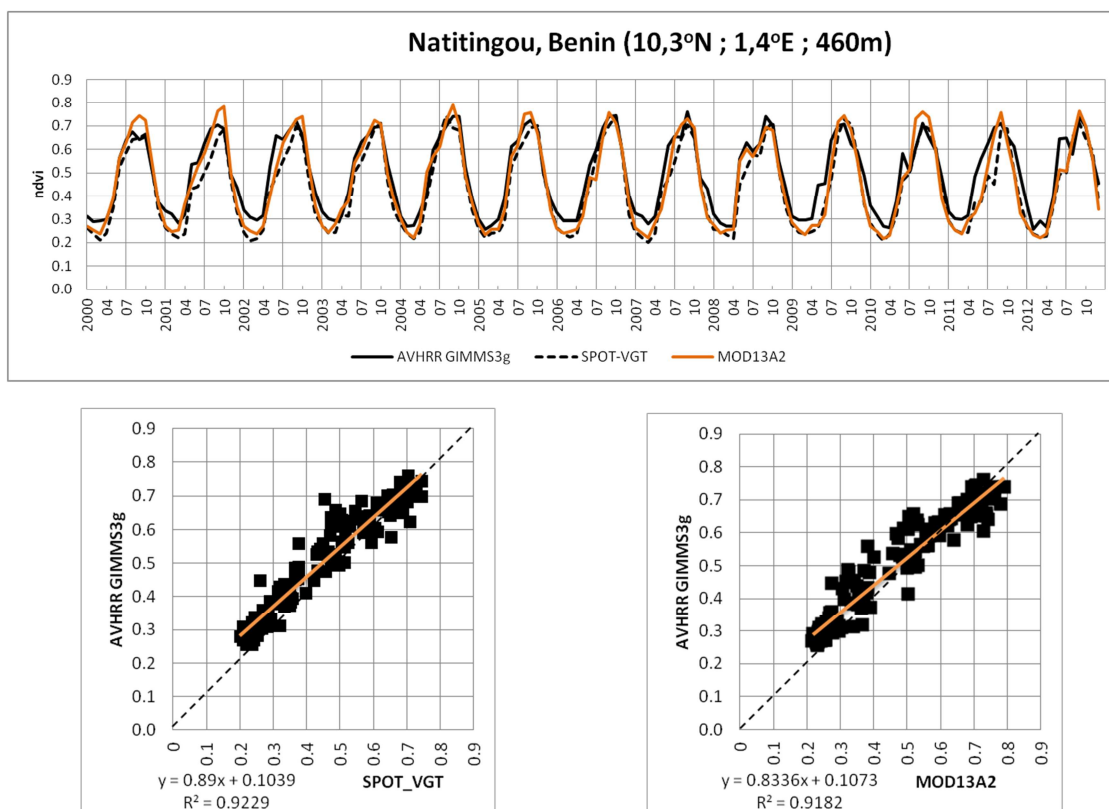


Figura 6.16. Serie temporal del NDVI para la localización de Natitingou, Benín.

Natitingou, en Benín (Figura 6.16), es la localización que está situada más al sur de la zona de estudio y está clasificada como tierras de cultivo en GLC-2000, y según el GLC-share el 43 % de la celda son tierras de cultivo, el 15 % zona de pasturas, el 11 % bosques y el 15 %

arbustos y matorrales (falta por asignar el 16 %). Los datos SPOT y MODIS se comportan de forma muy parecida, en especial en la época seca y a partir de 2004. La serie temporal se asemeja a tierras de cultivo (Figura 6.10).

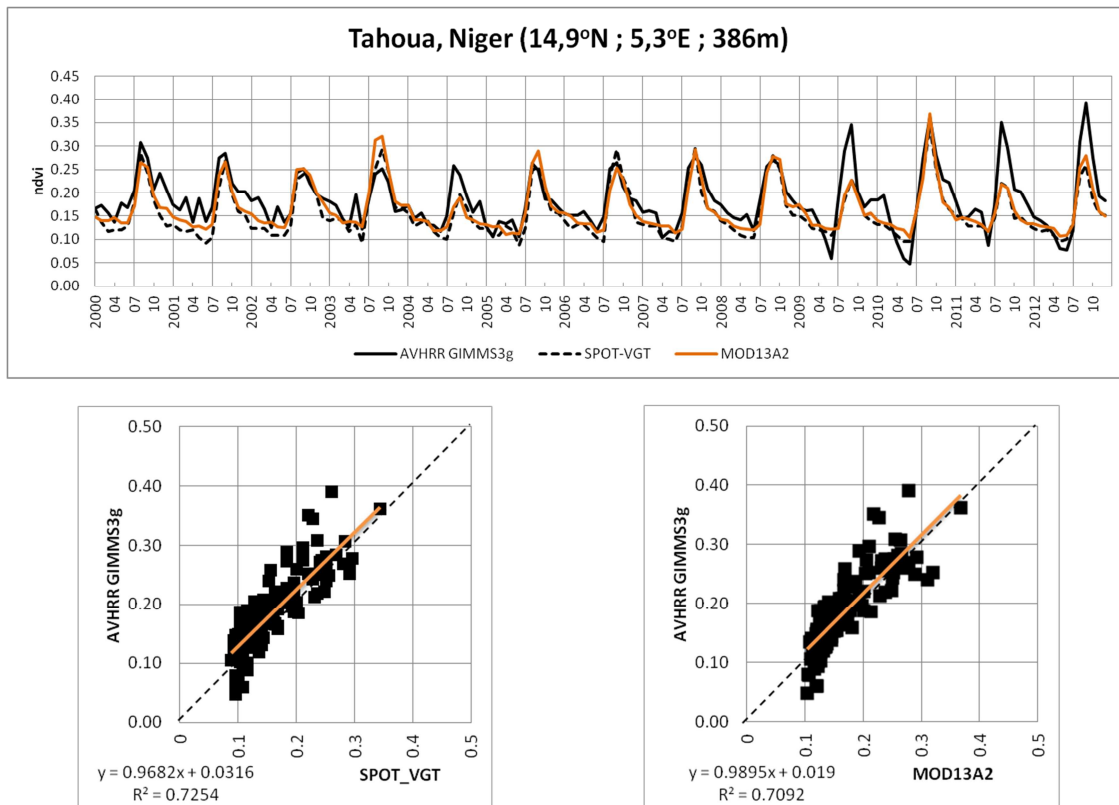
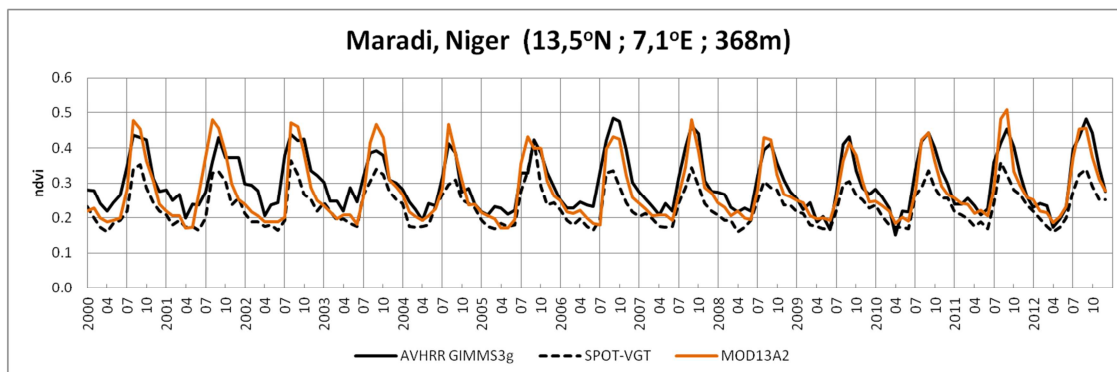


Figura 6.17. Serie temporal del NDVI para la localización de Tahoua, Niger.

La zona de Tahoua, en Níger (Figura 6.17), está clasificada como tierra de cultivos gestionados según GLC-2000, y según GLC-share está clasificada como tierra de cultivos en un 63 %, zona de pastura en un 26 %, bosque en un 10 % y suelo desnudo en un 1 %. Entre los años 2000 y 2009 los valores del NDVI son bastante bajos y se parecen bastante más a las áreas clasificadas como zona de pasturas que al comportamiento de tierras cultivo (Figura 6.10); entre 2009 y 2012 es probable que haya existido un cambio en la cubierta vegetal.



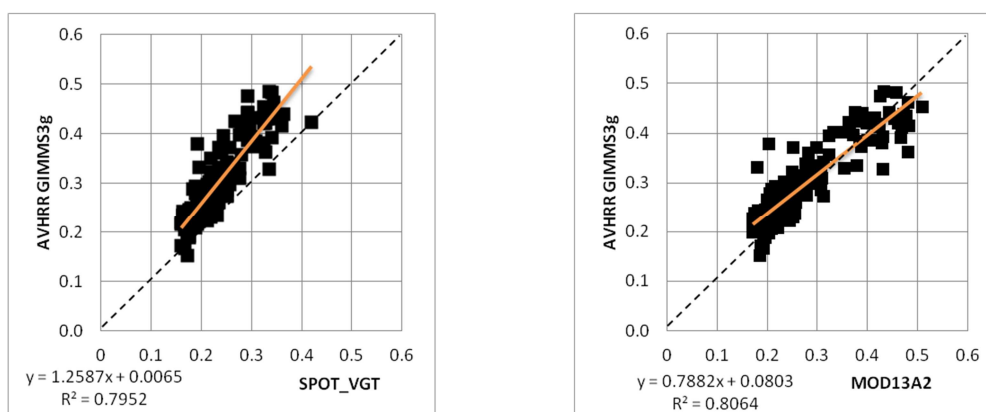


Figura 6.18. Serie temporal del NDVI para la localización de Maradi, Níger.

Maradi, en Níger (Figura 6.18), también está clasificada como tierra de cultivo en GLC-2000; en GLC-share está compuesta por un 52 % de tierras de cultivo, 1 % de zona de pastura, 46 % de vegetación escasa y 1 % de suelo desnudo. La serie temporal es muy dispar para los tres conjuntos de datos. Los valores de SPOT-VGT tienen valores muy bajos en comparación con AVHRR GIMMS3g y MOD13A2, y se asemeja más a una zona de vegetación escasa (Figura 6.10).

6.4 Análisis temporal del NDVI AVHRR GIMMS3g de 1982 a 2012

El índice NDVI procedente del sensor AVHRR y procesado por GIMMS es el que proporciona registros históricos más antiguos. Con más de 30 años de datos permite estudiar la evolución de la vegetación a nivel global y cuantificar los cambios en los ecosistemas como resultado de la variabilidad climática. Estos cambios se pueden medir de varias formas, como por ejemplo por la obtención de la media anual, la amplitud estacional o la longitud geográfica de la estación. El cálculo de la media anual ofrece una visión global de la actividad fotosintética; la amplitud estacional relaciona zonas de vegetación perenne y caducifolia así como el incremento en la densidad o intensidad de la vegetación; mientras que la longitud de la estación del NDVI muestra posibles cambios en la fenología. La detección de tendencias en series temporales del NDVI puede ayudar a identificar y cuantificar los cambios recientes en las características del ecosistema.

Este apartado se centra en el estudio de la serie temporal de AVHRR GIMMS a lo largo de los 31 años de los que se disponen datos.

6.4.1 Distribución temporal y espacial

La distribución espacial del NDVI anual promedio (Figura 6.19) entre 1982 y 2012 es tal y como se espera por lo observado en el mapa de coberturas del suelo GLC-share (Figura 6.9). En el suroeste se concentran los valores promedio anuales más elevados, que corresponden a las zonas de bosque y arbustos y matorrales. Conforme nos desplazamos hacia el norte, los valores del NDVI van disminuyendo progresivamente y los usos del suelo van cambiando de tierras de cultivo a zonas de pastura hasta alcanzar las zonas de vegetación escasa.

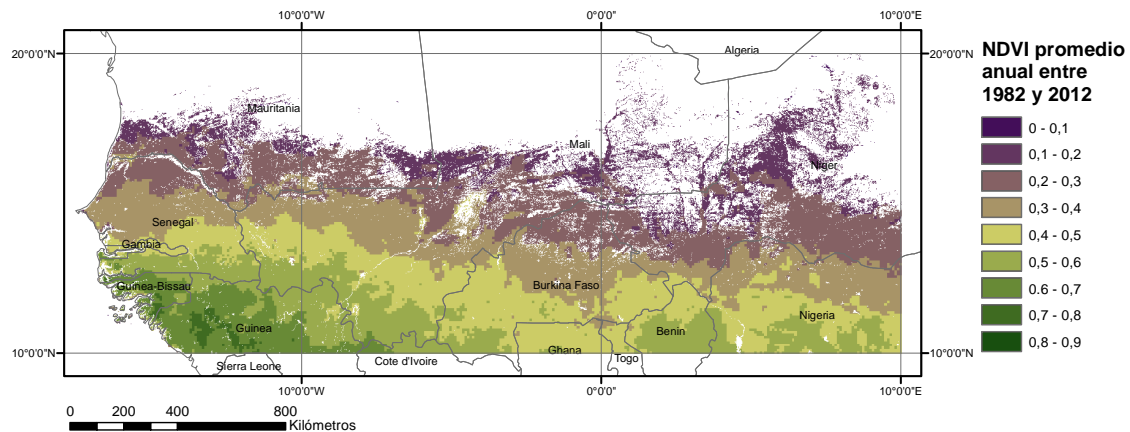


Figura 6.19. NDVI AVHRR-GIMMS3g promedio anual entre 1982 y 2012.

La magnitud de la desviación estándar del promedio anual del NDVI entre 1982 y 2012 se muestra en la Figura 6.20. La variación es mayor en las zonas que han sido clasificadas según el GLC-share como bosque y arbustos y matorrales; estos valores se han de observar con cierta precaución, ya que la adquisición de los mismos puede quedar afectada por aerosoles y/o una cubierta de nubes (Samanta et al., 2012; van Leeuwen et al., 2013). Cabe destacar que el valor es bastante bajo, lo que significa poca variación interanual durante los 31 años estudiados.

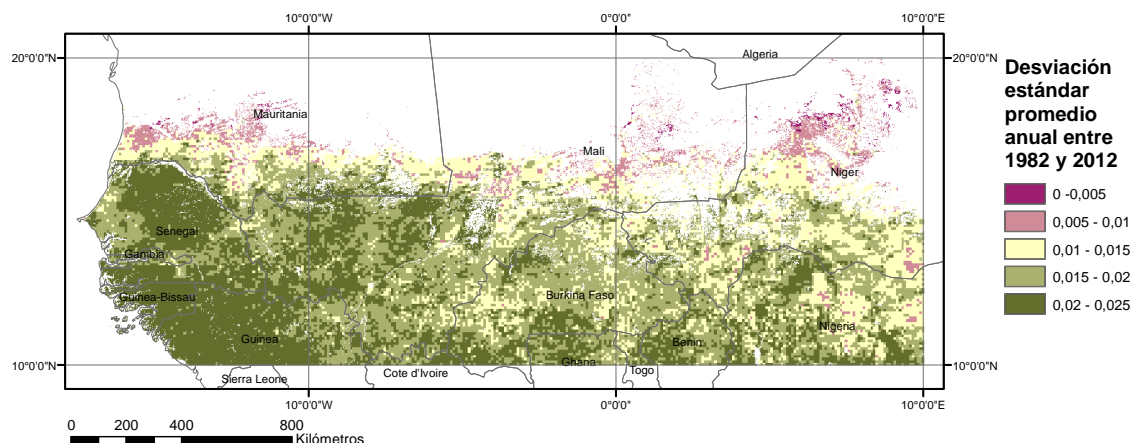


Figura 6.20. Desviación estándar del NDVI promedio anual entre 1982 y 2012.

Cuando se estudian tendencias sobre un largo periodo de tiempo, hay que tener en cuenta el hecho de que los valores inicial y final en la serie del NDVI pueden tener cierto impacto sobre el signo y el valor de la pendiente calculada (Dardel et al., 2014b). También se ha de considerar la agregación de los datos mensuales o anuales.

Inicialmente, se ha calculado la pendiente Theil-Sen con el promedio anual del NDVI, 31 imágenes en total, con un nivel de confianza del 95 %. El resultado (Figura 6.21) muestra que prácticamente el 60 % de la superficie muestra tendencias con significación estadística y que la pendiente promedio es de 0,0014 anual, lo que significa que se ha producido un aumento de 0,0434 entre 1982 y 2012 en el valor del NDVI.

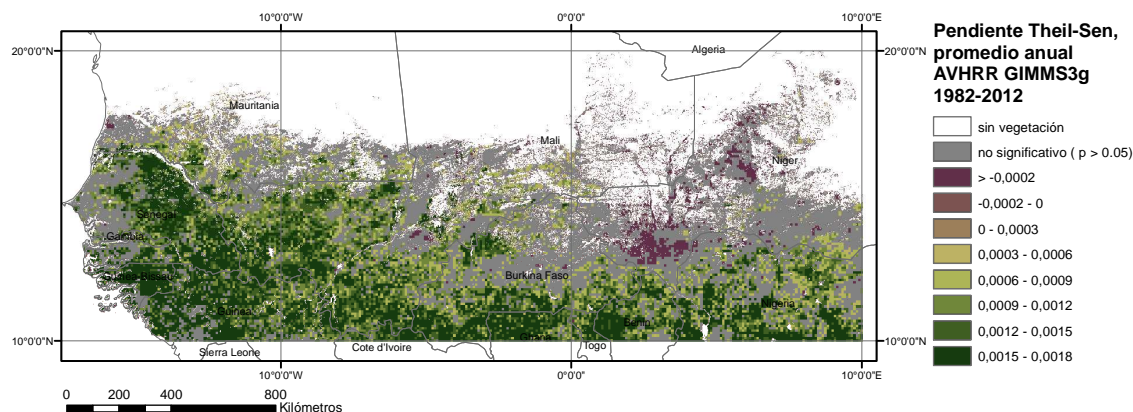


Figura 6.21. Pendiente Theil-Sen, promedio anual del NDVI de 1982 a 2012.

De Jong y de Bruin (2012) comentan la importancia de la agrupación temporal de los datos y de la elección del inicio de lo que sería la estacionalidad. Concluyen que se minimiza el riesgo de falsos resultados con un nivel de agregación correspondiente a un periodo completo en el ciclo fenológico.

Se ha calculado las tendencias mensuales para diferentes periodos de tiempo. Los resultados obtenidos muestran un grado de significación estadística muy bajo en grandes áreas y no se han incluido los resultados en este documento.

La serie temporal calculada para cada tipología de vegetación (Figura 6.22) muestra una ligera tendencia creciente; las clases con mayor tendencia son bosques y arbustos y matorrales (un aumento del NDVI de 0,037 en 31 años), seguido de tierras de cultivo (aumento del NDVI de 0,030), y los que menos aumento muestran son zona de pasturas y vegetación escasa (0,011).

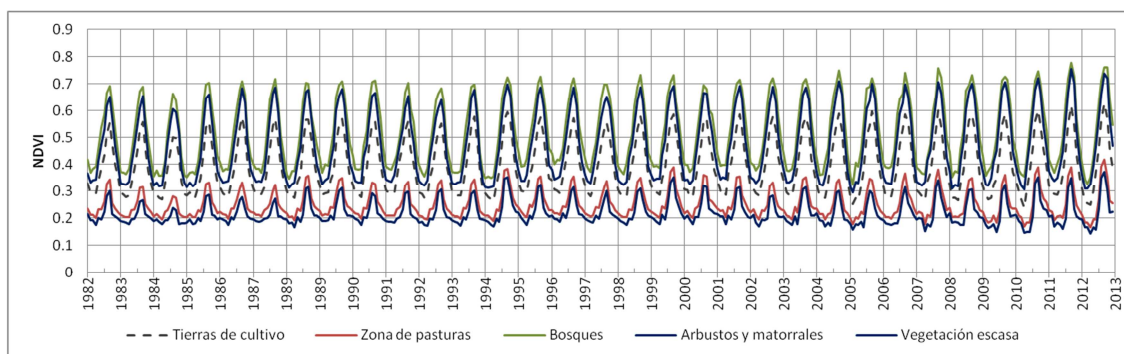


Figura 6.22. Distribución temporal del NDVI promedio en toda el área de estudio en función de la tipología de vegetación entre 1982 y 2012.

Si se observa el comportamiento en los meses en los que la vegetación alcanza su punto máximo (Figura 6.23), puede apreciarse una tendencia positiva del NDVI en los meses de agosto, septiembre y octubre; es decir, durante los meses en los que se alcanza el pico máximo de la vegetación; hecho que puede ser interpretado como un incremento de la amplitud del NDVI (Heumann et al., 2007). En cambio, durante los meses de mayo, junio y en menor medida julio, la tendencia es negativa; de hecho, esta tendencia no se observa en el periodo comprendido entre 1981 y 2000 y podría estar relacionada con un retraso en el inicio de la época de lluvias.

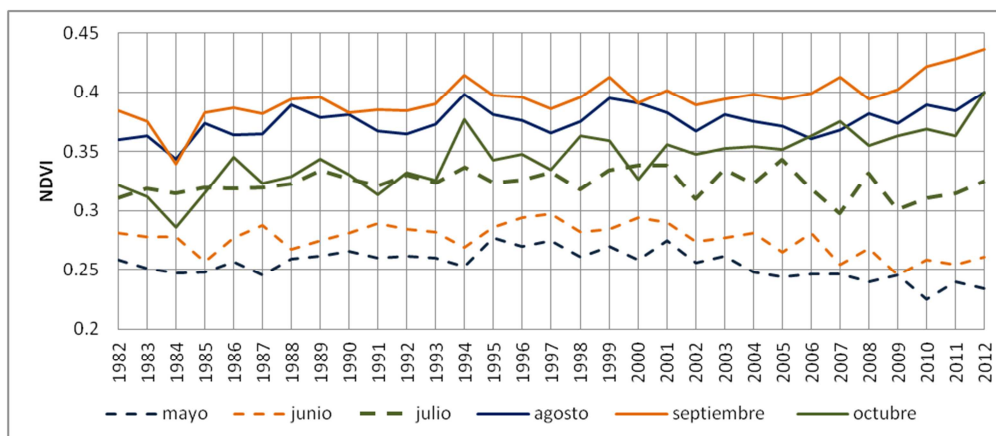


Figura 6.23. Valor del NDVI en todo el Sahel en los meses de mayo a octubre.

El cálculo de las anomalías (Figura 6.24) de los meses de mayo a julio de 1982 a 2012 confirma la existencia de una tendencia negativa, aunque esta se sitúa entre los años 2000 y 2012.

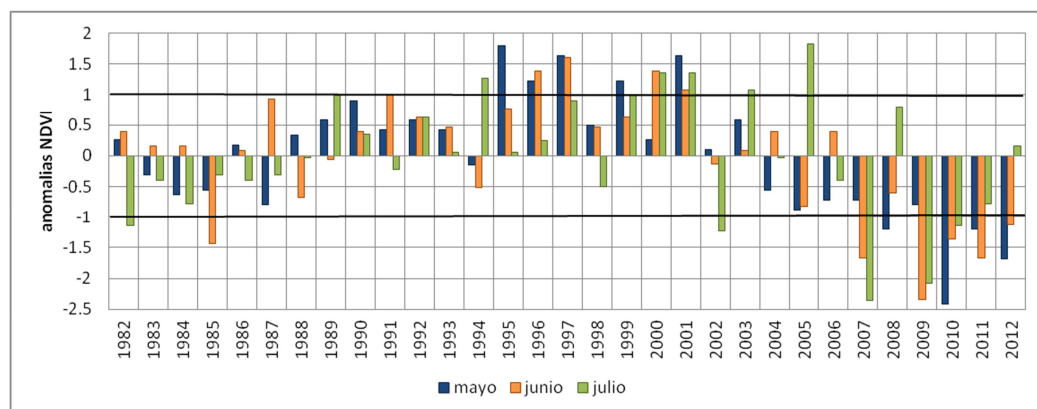


Figura 6.24. Anomalías del NDVI en los meses de mayo, junio y julio de 1982 a 2012.

6.4.2 Análisis de la tendencia estacional

La tendencia de la estacionalidad se ha obtenido calculando la amplitud y la fase del ciclo anual del NDVI de cada celda durante un año y repitiendo este proceso para los 31 años de datos. Posteriormente, con las imágenes resultado, se ha hallado la significación estadística según Mann-Kendall y la pendiente Theil-Sen tanto para la amplitud como para la fase que determinan la existencia y el signo de la tendencia.

La amplitud representa el pico del NDVI anual, que se define como la diferencia entre el valor máximo y mínimo del NDVI en la curva sinodal anual para cada celda de la imagen. Los valores positivos de la pendiente Theil-Sen para la amplitud indican la existencia de más vegetación; los valores negativos, una disminución de la misma a lo largo del tiempo estudiado. En el periodo comprendido entre 1982 y 2012 (Figura 6.25) se observa en la práctica totalidad del área estudiada una pendiente positiva promedio de amplitud 0,0027 unidades del NDVI por año. Este resultado concuerda con lo observado en la Figura 6.23, donde se ve un aumento significativo del NDVI en los meses de agosto, septiembre y octubre.

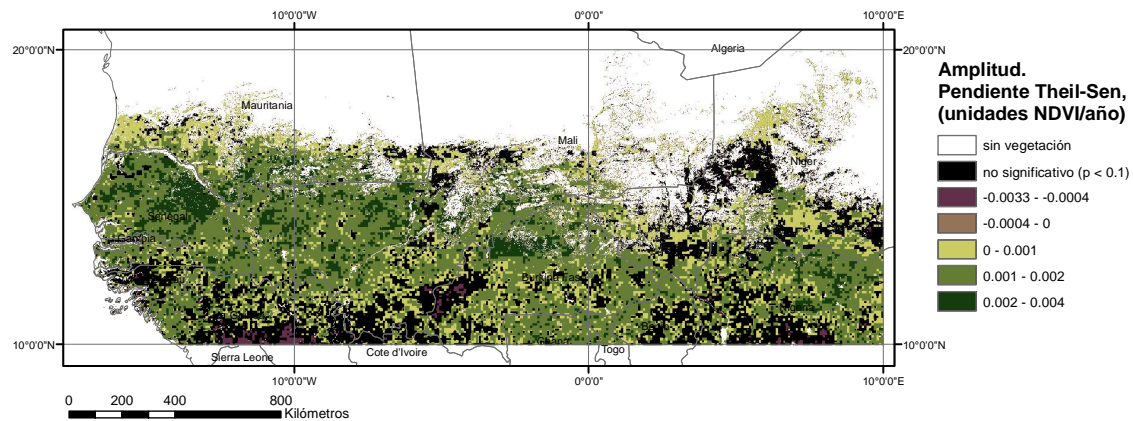


Figura 6.25. Pendiente Theil-Sen de la amplitud de la curva estacional del NDVI entre 1982 y 2012, nivel de confianza del 95%, unidades NDVI/año.

Al contrario de lo que pasa con la amplitud, la mayoría de celdas de la pendiente de la fase tienen tendencia negativa, lo que significa que el momento en el que se produce el pico máximo de la curva estacional se ha retrasado con el tiempo. El 92 % del área tiene tendencia negativa con un valor promedio de la pendiente de $-0,6370$, lo que quiere decir que aproximadamente el pico máximo se ha retrasado unos 20 días en 31 años. Esto concuerda con la tendencia negativa del NDVI en los meses de mayo, junio y julio que se ha observado en el apartado anterior; pero se contradice con los resultados encontrados por Kaspersen (Kaspersen et al., 2011), quien calcula la pendiente promedio de la fase para la totalidad del Sahel desde el océano Atlántico hasta el Mar Rojo en una zona que no es homogénea climáticamente.

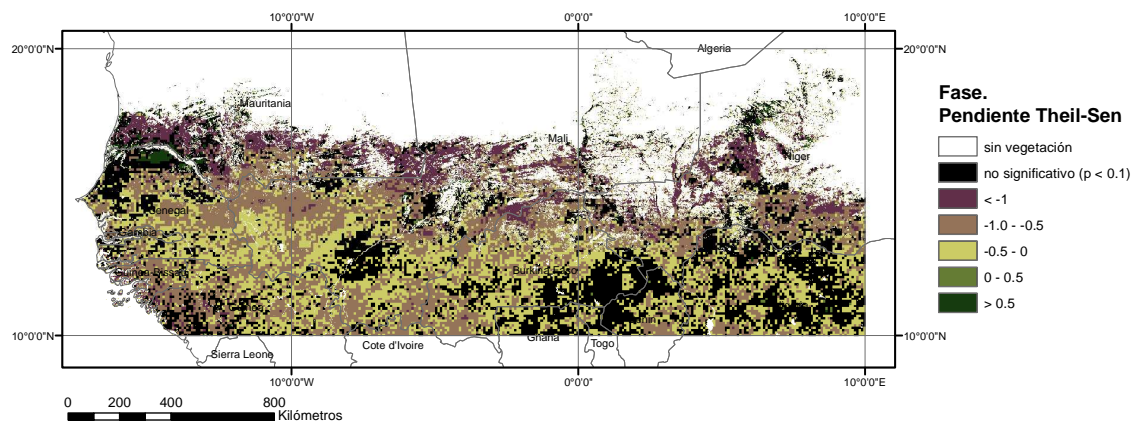


Figura 6.26. Pendiente Theil-Sen de la fase de la curva estacional del NDVI entre 1982 y 2012, nivel de confianza del 95%, unidades grados/año.

6.4.3 Análisis del ciclo fenológico de la vegetación

La zona del Sahel estudiada en esta tesis tiene una única estación de lluvias y la vegetación tiene un ciclo fenológico de 12 meses de duración que se inicia aproximadamente en el mes de abril y finaliza en el mes de marzo del año siguiente. La obtención de los parámetros fenológicos en la zona es compleja debido a que las imágenes de satélite pueden verse enmascaradas por la presencia de nubes dispersas o aerosoles (Samanta et al., 2012), especialmente durante la temporada de lluvias, y esto puede interferir en la detección de fenómenos concretos como el inicio de la estación. Además, en las zonas de tierra de cultivo (de secano) pueden ocurrir falsos inicios de la estación. Todos estos factores pueden influir en

la obtención correcta de los parámetros fenológicos e inducir análisis sesgados (Meroni et al., 2014).

La estacionalidad está marcada, tal y como se espera, por un gradiente de sur a norte tanto en el inicio de la misma (Figura 6.27) como por la duración (Figura 6.28). En el sur, donde se encuentran las zonas de bosque más denso, la estación se inicia principalmente durante el mes de mayo y su duración es de seis a siete meses; en cambio, a medida que nos desplazamos hacia el norte, el inicio de la estación se retrasa en el tiempo y la duración se acorta.

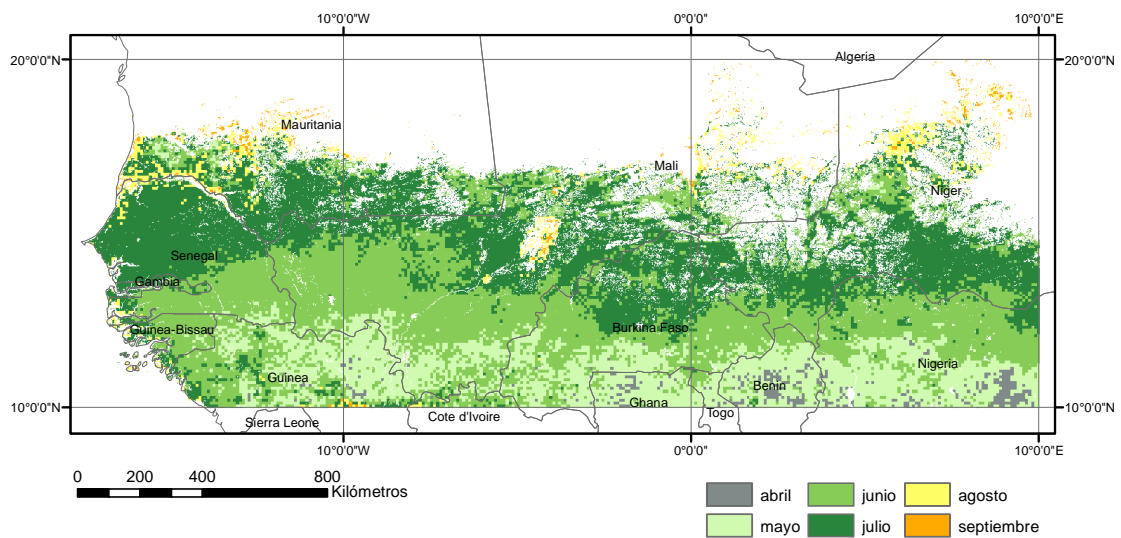


Figura 6.27. Mes de inicio de la estación de lluvias entre los años 1982 y 2012.

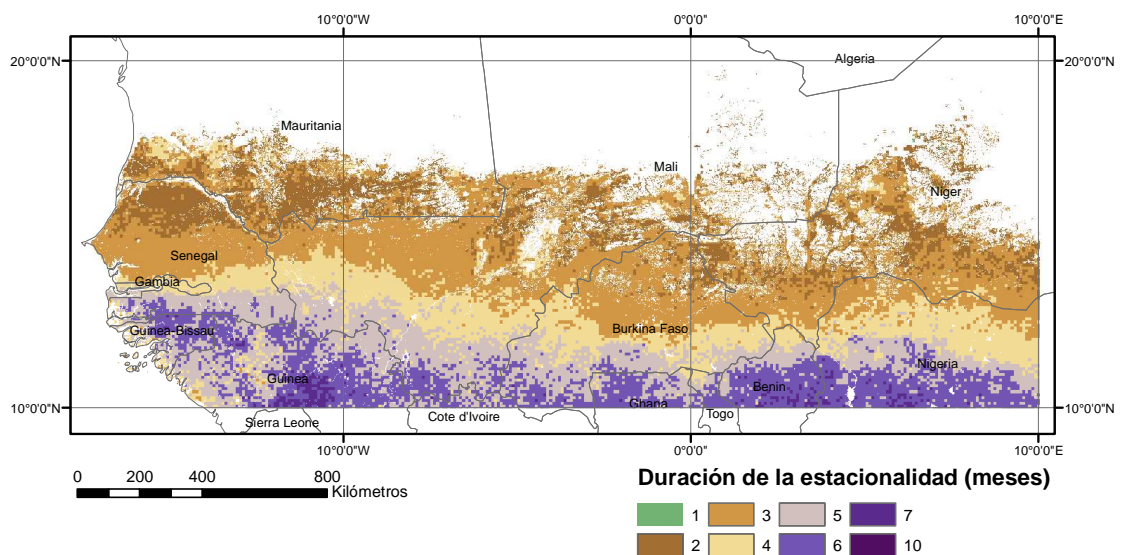


Figura 6.28. Duración promedio (en meses) de la estación lluviosa entre los años 1982 y 2012.

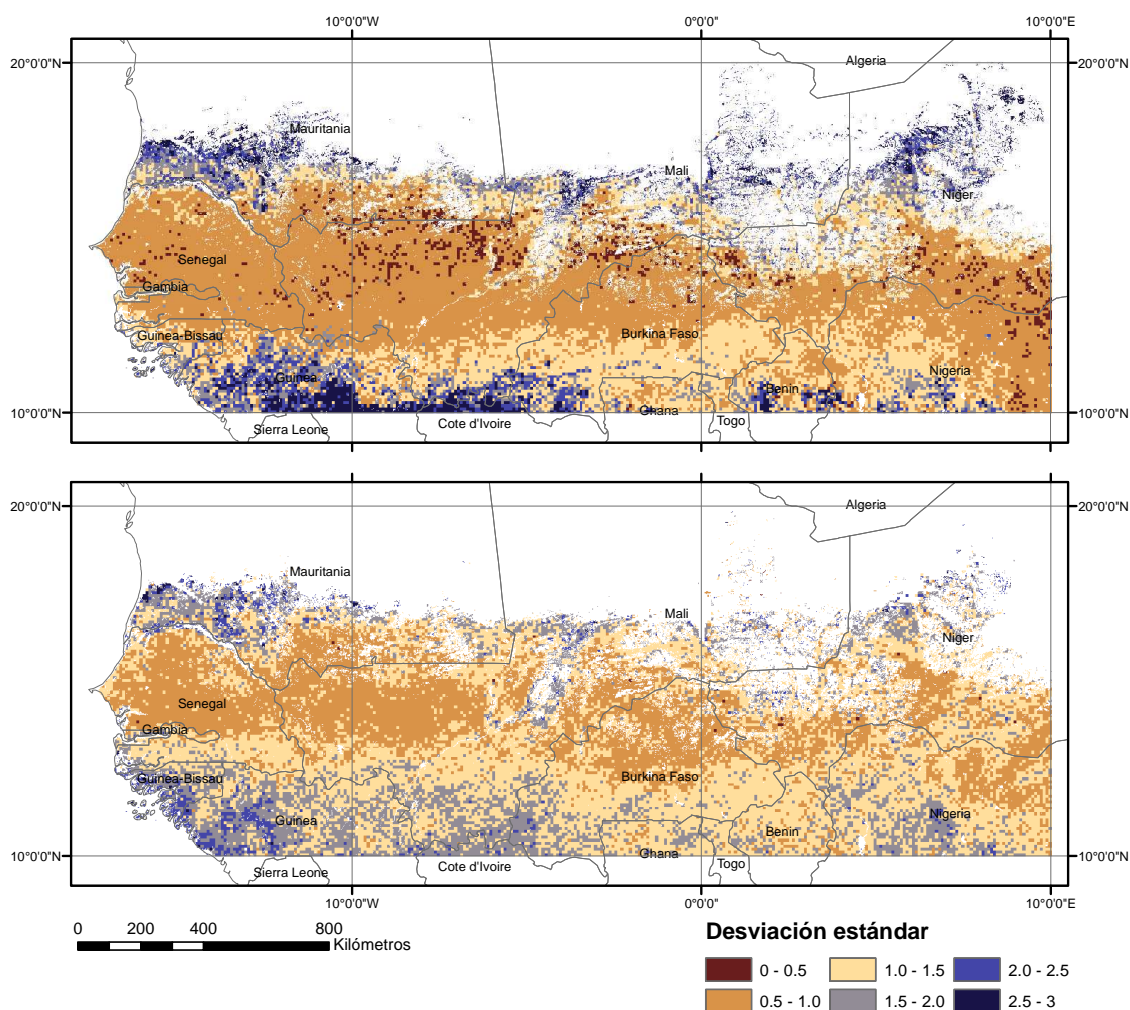


Figura 6.29. Desviación estándar entre 1982 y 2012 del inicio de la estación de lluvias (parte superior) y la duración de la misma (parte inferior).

El valor y la variabilidad de la desviación estándar en los patrones estacionales del NDVI muestran la existencia de una pequeña variación significativa respecto al inicio de la temporada, especialmente en la zona que comprende latitudes intermedias del área de estudio (Figura 6.29, imagen superior). En cambio, en la zona sur y el extremo norte la variación es mayor; esto podría ser causado más por una posible contaminación de los datos por aerosoles o nubes que por la misma variación. Respecto a la duración de la estación, la desviación estándar muestra más variabilidad (Figura 6.29, imagen inferior) aproximadamente desde el paralelo 12° hacia el sur.

6.5 Conclusiones

En este capítulo se han comparado los valores del NDVI de AVHRR-GIMMS3g respecto SPOT-VGT y MOD13A2 en el periodo de tiempo en el que han coincidido, de 2000 a 2012, 13 años en total. El análisis se llevó a cabo para probar la exactitud de los datos AVHRR GIMMS3g, de los que se tiene un registro histórico de más de 31 años, con el supuesto de que los datos SPOT-VGT y MOD13A2, más recientes, son de mayor calidad.

Los tres conjuntos de datos no muestran patrones idénticos en la tendencia del NDVI. De forma general, las series temporales de valores SPOT-VGT y MOD13A2 se asemejan bastante

(Figura 6.3). Los datos SPOT-VGT se caracterizan por un valor alto de la pendiente Theil-Sen (Figura 6.4) y una significación estadística alta en comparación con los datos MOD13A2 en los 13 años analizados. Las discrepancias mayores de la tendencia se encuentran en las zonas con vegetación densa, áreas donde la precipitación anual es de 1.000 mm, principalmente en Guinea, donde las pendientes de la recta de regresión MOD13A2 son negativas, mientras que en la regresión SPOT-VGT las pendientes son positivas. En cambio, en las zonas intermedias (Senegal y sur de Mauritania, Malí y Níger) se obtiene una concordancia más alta. Los valores AVHRR GIMMS3g prácticamente no muestran significación estadística en estos 13 años.

Las diferencias observadas entre los tres conjuntos de datos pueden ser debidas a varias causas. Una de ellas es el diferente rango espectral en las bandas del rojo y del infrarrojo cercano de los tres sensores, tal y como se comentó en la introducción de este capítulo. Otra posible causa son los diferentes criterios de calidad implícitos en cada conjunto de datos: mientras que los datos AVHRR GIMMS3g y MOD13A2 indican aquellas celdas que contienen nubes, los datos MOD13A2 añaden otros parámetros, como el grado de aerosoles en la atmosfera, con lo cual el resultado final se adapta más a la realidad. Otro factor es la sustitución del sensor SPOT-VGT1 por SPOT-VGT2, que implica un cambio en la respuesta espectral. Por lo tanto, se cree que los valores de MOD13A2 son los más precisos para validar los datos AVHRR GIMMS3g.

La correlación entre el NDVI AVHRR GIMMS3g y MOD13A2 (Figura 6.8 inferior) tiene cierto grado de similitud en las regiones semiáridas pero es inexistente en las áreas más húmedas. Todo ello sugiere que las tendencias en los datos GIMMS deben ser tratadas con precaución.

El conjunto de datos AVHRR GIMMS ha evolucionado considerablemente en sus tres versiones; sin embargo, la tendencia de un aumento de vegetación en el Sahel es un resultado persistente en todas las publicaciones basadas en las diferentes versiones GIMMS (por ejemplo: Anyamba y Tucker, 2005; Beck et al., 2011; Brown et al., 2006; Dardel et al., 2014; Fensholt et al., 2006, 2009; Fensholt y Rasmussen, 2011). En nuestro estudio también se ha encontrado un ligero aumento de la vegetación en los análisis estacionales de la misma, un aumento en su amplitud y, además, se ha observado cómo el momento en el que se produce el pico máximo de vegetación tiene tendencia a retrasarse en el tiempo.

CAPÍTULO 7 Comparación del régimen de lluvias y la evolución de la vegetación

7.1 Introducción

El Sahel es la región donde se han evidenciado las mayores variaciones de precipitación y vegetación en las últimas tres o cuatro décadas (Nicholson, 2005), y su estudio desde una perspectiva de variabilidad y cambio climático es el objeto de esta tesis. Las graves sequías acaecidas durante la década de 1970, que se alargaron hasta mediados de la década siguiente, han sido ampliamente estudiadas tanto por sus graves consecuencias sobre la población, como porque se considera uno de los primeros signos de cambio climático global (Anyamba y Tucker, 2005; Dardel et al., 2014b; Hountondji et al., 2006; Huber et al., 2011; Kaspersen et al., 2011; Nicholson et al., 1990; Nicholson, 2005, 1993; Vrieling et al., 2013).

Estas graves sequías del siglo pasado han dado lugar a un debate científico sobre sus causas y sobre uno de los efectos que conllevan, la desertificación. Algunas de las causas de la degradación del suelo están asociadas directamente con la falta de agua de lluvia; otras, con los cambios en las prácticas de cultivo, la sobreexplotación de la tierra, el pastoreo excesivo o la tala continuada de árboles (Dardel et al., 2014a). Actualmente este debate sigue vivo (Fensholt et al., 2013; Hein y De Ridder, 2006; Hein et al., 2011; Hountondji et al., 2006; Prince et al., 2007), aunque sin resultados concluyentes ya que en los procesos de desertificación casi siempre interviene el binomio clima-hombre.

El grado de disponibilidad de agua es el principal factor que hay que tener en cuenta al analizar la dinámica de la vegetación en regiones semiáridas y en especial en el Sahel. El ecosistema de la región es altamente sensible no sólo a la cantidad anual de precipitación, sino también a la distribución de estas precipitaciones (inicio, frecuencia y duración de la temporada de lluvias), que, a su vez, condicionan los patrones de desarrollo de la vegetación. Para el desarrollo de la vegetación en esta tipología de ambientes, donde la vegetación está adaptada a recibir poca agua (Meroni et al., 2014), la frecuencia de la precipitación es tan importante como la cantidad total de la misma.

En los últimos años, se ha observado un ligero repunte de la precipitación en el Sahel, con unas cantidades que se acercan a las del estadio anterior a las grandes sequías (Lebel y Ali, 2009). También, se ha evidenciado una recuperación de la vegetación, a raíz de lo cual han

surgido dos teorías como origen de este fenómeno: por un lado, la variabilidad climática, con una recuperación de las lluvias, y por otro, la mejora de las técnicas de cultivo y la recuperación de tierras (Anyamba y Tucker, 2005; Bégué et al., 2011; Dardel et al., 2014b; Fensholt et al., 2009; Fensholt y Rasmussen, 2011; Forkel et al., 2013; Giannini et al., 2008; Herrmann et al., 2005; Olsson, 2005). Sin embargo, los años de fuertes sequías continúan sucediendo (FAO, 2012) junto con episodios de precipitaciones extremas (Haeseler, 2012), como por ejemplo las que provocaron unas graves inundaciones en Niamey, Níger, durante el mes de agosto de 2012 (OXFAM, 2012).

Así mismo, se ha probado, con datos de campo recogidos durante varios años, que la evolución de la vegetación no es uniforme en todo el Sahel (Dardel et al., 2014b). Aunque, en áreas extensas, tal y como se ha comentado en el párrafo anterior, sí se observa una tendencia positiva en la recuperación de la vegetación, en otras regiones, sin embargo, la tendencia es negativa. Por ejemplo, Dardel et al. (2014a) han observado, con datos de campo y de satélite, una disminución de la vegetación en el suroeste de Níger, un país en el que las tierras dedicadas al cultivo han pasado de ser el 10 % de su superficie en 1950 a representar el 80 % en la actualidad (Descroix et al., 2009).

En las últimas décadas y relacionado con las grandes sequías se ha estudiado el caudal de los ríos y la escorrentía superficial. Estos análisis han puesto de manifiesto el incremento de la escorrentía superficial y del caudal de los ríos en algunas cuencas del Sahel durante las grandes sequías de las décadas de 1970 y 1980, un comportamiento hidrológico inesperado que se conoce como la «paradoja del Sahel» y que ha sido estudiado por varios autores (Amogu et al., 2010; Dardel et al., 2014a, 2014b; Descroix et al., 2009; Gardelle et al., 2010; Mahé y Paturel, 2009), aunque no todos llegan a las mismas conclusiones.

El aumento de la vegetación se contrapone con las teorías sobre la degradación del suelo y/o la desertificación del Sahel en estas tres últimas décadas. Si bien algunos autores constatan que se produce una degradación del suelo (Hein y De Ridder, 2006; Hein et al., 2011; Mahé y Paturel, 2009), otros concluyen que no existen grandes extensiones en las que haya muestras de esta degradación (Fensholt et al., 2013; Herrmann et al., 2005; Prince et al., 2007). Sin embargo, las series temporales, tanto de datos proporcionados por satélite como terrestres, han confirmado la naturaleza dinámica del ecosistema del Sahel y su disposición a cambiar, pero no hay consenso en la comunidad científica acerca de la dirección de los cambios ni de las causas subyacentes de dichos cambios.

La posibilidad de monitorizar los ecosistemas en el Sahel se debe, en gran medida, a los avances en el campo de la teledetección. La disponibilidad de datos desde principios de la década de 1980, cada vez con mejores resoluciones espaciales, espectrales y temporales, ha permitido conocer el comportamiento de las precipitaciones y la dinámica de la vegetación; aunque es importante advertir sobre sus limitaciones, especialmente relacionadas con la observación de la vegetación. La forma más usual de estudiarla es a través del índice NDVI — que ya se ha presentado en capítulos anteriores—, que permite determinar el estado fenológico de la vegetación pero no la tipología de la misma, con lo cual, podría ocultar cambios en la cubierta vegetal no asociados a la dinámica intrínseca de la vegetación, como por ejemplo cambios en la composición de la vegetación.

La relación entre la precipitación y la vegetación en el Sahel ha sido estudiada ampliamente. La mayoría de los estudios realizados se basan en el análisis, por un lado, de series temporales de indicadores de vegetación obtenidos a través de imágenes de satélite, principalmente el NDVI, y, por el otro, de mediciones de precipitación de estaciones meteorológicas o estimaciones de precipitación por satélite. Nicholson et al. (1990) encontraron que en el Sahel existía una relación lineal entre la precipitación y el NDVI por debajo de un umbral de precipitación que corresponde a 1.000 mm/año. Por lo tanto, si se supone la existencia de una

relación lineal y la variable dependiente es el índice de vegetación, los residuos serán independientes de la precipitación y mostrarán cambios en la producción vegetal que no están relacionados con la precipitación. Los residuos pueden ser positivos o negativos y reflejar los cambios en la composición de la vegetación, la cobertura del suelo, o indicar un proceso de degradación del suelo.

En este capítulo se pretende profundizar en la relación existente entre vegetación y precipitación en la zona semiárida del Sahel durante un periodo de tiempo lo más largo posible. Y una de las primeras preguntas que a uno se le ocurre es la siguiente: si existe una relación lineal entre el NDVI y la precipitación, ¿dicha relación tendrá el mismo nivel de correlación y el mismo signo para diferentes datos de precipitación durante el mismo periodo de tiempo?

Los valores del NDVI que abarcan el periodo de tiempo más largo son los que ofrece la nueva versión del AVHRR GIMMS3g, que va desde julio de 1981 a diciembre de 2012.

Y como datos de precipitación se han seleccionado tres series que cubren el periodo comprendido entre 1983 y 2012, las fuentes de las cuales han sido diferentes. Así, los datos de precipitación seleccionados se han obtenido de las siguientes bases de datos:

- GPCC, que proceden exclusivamente de datos de estaciones meteorológicas que han sido interpolados para cubrir todo el territorio;
- ARC2, que contiene datos de la banda infrarroja de satélites en órbita estacionaria, calibrados con datos de estaciones meteorológicas terrestres;
- TAMSAT, que sólo utiliza para su elaboración datos de satélite.

Para una descripción más detallada de las características de los datos de precipitación seleccionados, véase el apartado «Fuente de datos» del capítulo 3.

Los objetivos del presente capítulo se han planteado a partir de la indagación de esta relación entre precipitación y vegetación entre 1983 y 2012, y se centran en responder las siguientes preguntas:

- ¿Se puede explicar el aumento de la vegetación entre 1983 y 2012 exclusivamente por un aumento de la precipitación? ¿Este aumento es homogéneo en todo el Sahel?
- ¿La relación entre precipitación y vegetación es similar para los tres conjuntos de datos de precipitación? ¿Y constante en el tiempo?
- ¿Se pueden utilizar los valores del NDVI como una aproximación en la monitorización de las variaciones pluviométricas?
- ¿Se pueden interpretar los residuos como indicadores de cambios en el uso de la tierra?
- ¿Los resultados obtenidos a escala global en la región del Sahel se pueden trasladar a puntos concretos de la misma?

Este capítulo está dividido en siete epígrafes: el primero incluye la introducción y los objetivos que se han marcado para el capítulo; en el segundo se presenta la descripción del pre-procesado realizado a los datos; en el tercero se muestra el análisis lineal entre la vegetación y la precipitación; en el cuarto se comparan diferentes periodos de tiempo del análisis del punto anterior; en el quinto se ofrece un estudio de los residuos generados en la relación lineal; en el sexto se analizan puntos concretos, y por último, en el séptimo epígrafe se describen las conclusiones del capítulo.

7.2 Preprocesado

Los datos analizados en este capítulo tienen resoluciones espaciales diferentes y se han transformado a la misma resolución que los valores del NDVI AVHRR GIMMS3g, 0,0833°. El sistema geodésico de referencia es WGS84.

A los valores de la serie temporal del NDVI AVHRR GIMMS3g se les han aplicado los criterios de calidad que van incorporados en la misma imagen, y se han eliminado todas aquellas celdas que no cumplían los estándares de calidad (para más información, véase el epígrafe de preprocesado del capítulo anterior).

Se ha transformado la resolución temporal de todos los valores a mensual. El criterio de agrupación de los valores del NDVI AVHRR GIMMS3g ha sido el de valor máximo de los dos archivos que comprenden el mes. La idoneidad de este criterio se ha comentado en el capítulo anterior.

En cambio, se ha contabilizado la precipitación como la suma de 3 meses, el mes que interesa más los dos meses anteriores. Este criterio, utilizado previamente por varios autores, ha confirmado que el NDVI se correlaciona mejor con la lluvia acumulada en tres meses que con la precipitación de un mes, aunque exista una cierta separación temporal entre precipitación y el NDVI (Herrmann et al., 2005; Huber et al., 2011; Nicholson et al., 1990).

En algunos análisis se ha trabajado con valores anuales; estos han sido agrupados como suma de doce meses tanto para los archivos del NDVI como para los de precipitación.

Para poder comparar los datos entre sí, se han normalizado estos datos respecto al mismo intervalo de tiempo.

Se han limitado los análisis a las zonas en las que existe vegetación según el mapa de coberturas globales de la FAO (Latham et al., 2014), con lo cual se ha obviado toda la zona norte, donde la precipitación es muy escasa y la cobertura predominante es de suelo desnudo y desierto (Figura 6.9).

7.3 Relación espacial y temporal entre el NDVI y la precipitación

Como primer paso se ha hecho una comparación visual entre el mapa del promedio anual del NDVI y los de las tres fuentes de precipitación entre 1983 y 2012. Estos mapas guardan una buena correspondencia geográfica respecto a sus valores máximo y mínimo (Figura 7.1). Los valores máximos del NDVI y de precipitación se producen en la zona sur del área de estudio, y el pico máximo se concentra en Guinea; los valores mínimos ocupan toda la franja norte.

Esta comparación visual (Figura 7.1) permite detectar algunas diferencias entre estos mapas de valores promedio. Por ejemplo, en Guinea, donde se producen los valores máximos anuales, tanto de precipitación como de vegetación, los picos máximos de precipitación para los datos ARC2 y TAMSAT se sitúan en la zona interior montañosa, con valores promedio de 1.500 mm/año, mientras que para los datos GPCC el pico de máxima precipitación se sitúa en la costa, con un promedio de 2.000 mm/año. Otra de las diferencias que se han observado es el gradiente más elevado en la dirección sur-norte para los datos de precipitación GPCC en comparación con los de las otras bases de datos. Los datos de la base GPCC recogen más cantidad de lluvia en la zona sur, pero, en cambio, menos en el norte.

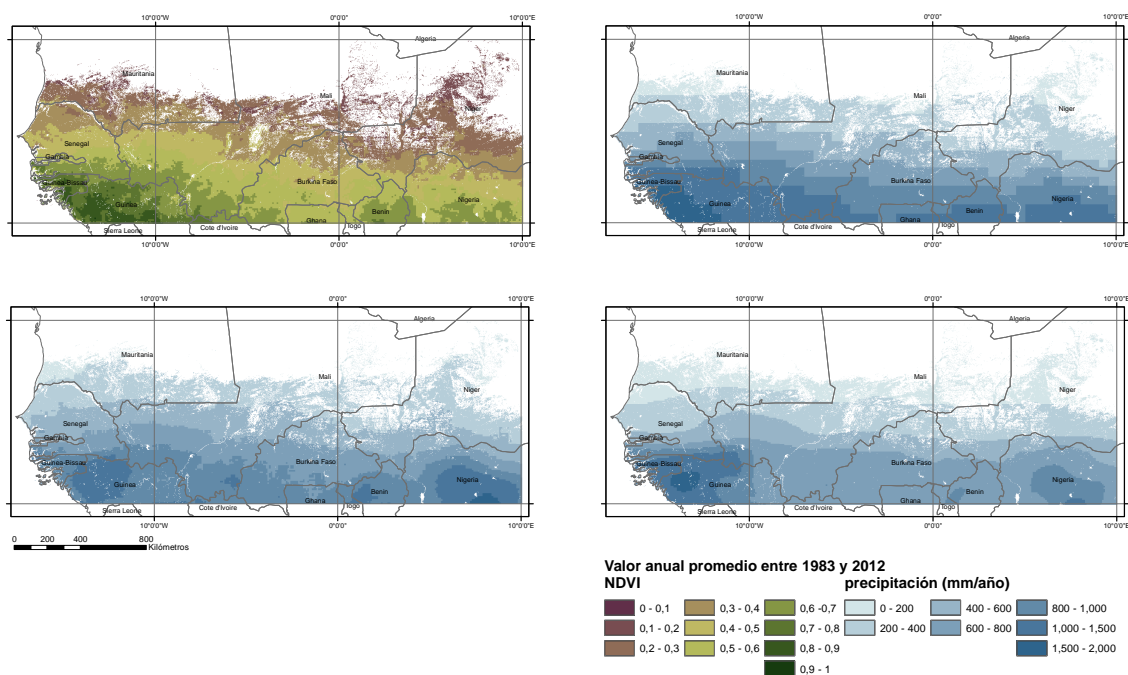


Figura 7.1. Valor promedio anual entre 1983 y 2012 del NDVI (parte superior izquierda) y la precipitación, datos GPCC (parte superior derecha), ARC2 (parte inferior izquierda) y TAMSAT (parte inferior derecha).

Las anomalías mensuales para los cuatro conjuntos de datos se han calculado para el periodo 1983-2012 (Figura 7.2). En ellas se observa un ligero desplazamiento o desfase temporal de los datos de precipitación respecto a los de vegetación, ya que las primeras lluvias se producen entre los meses de abril y mayo, y los primeros signos de vegetación se muestran entre los meses de junio y julio. El resultado que se ha observado en el gráfico es coherente con la dinámica de la vegetación usual en zonas semiáridas.

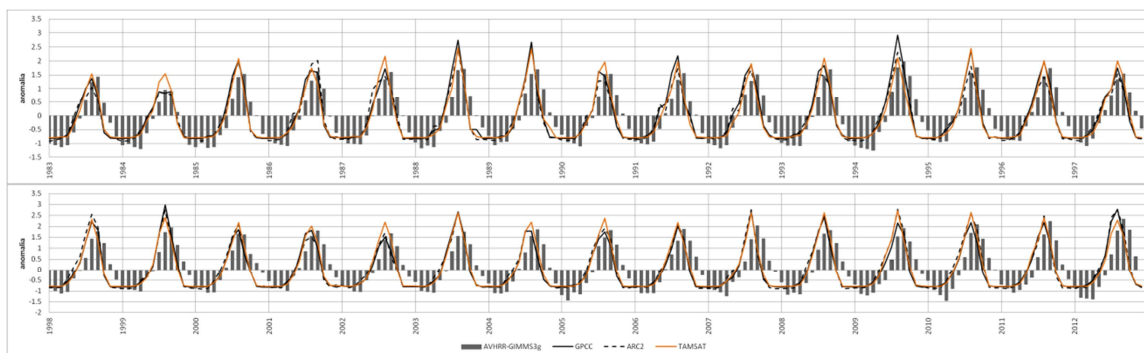


Figura 7.2. Anomalía mensual del NDVI GIMMS3g y precipitación GPCC, ARC2 y TAMSAT entre 1983 y 2012.

Las anomalías de los valores anuales, que se han calculado como la suma de los 12 meses del año, muestran una buena coherencia (Figura 7.3). Los años de anomalías negativas del índice de vegetación se concentran en los primeros quince del periodo, y los de anomalías positivas, en los restantes; en los últimos 5 años se muestran valores continuos excepcionalmente elevados. Las anomalías de precipitación siguen aproximadamente el mismo patrón y con una buena concordancia entre ellas. Los datos Tamsat y NDVI AVHRR-GIMMS3g concuerdan en signo en los 30 años analizados. En los años 1994 y 2002 se observan discrepancias acusadas entre anomalías de precipitación y vegetación.

En el año 1994 se observa una anomalía negativa del NDVI en el conjunto de la zona estudiada (Figura 7.3), lo cual no concuerda con los resultados que presentan Anyamba et al. (2014), que estudian un área más pequeña, en concreto entre los 5° O y 10° O y los 12° N y 17° N, pero con una anomalía positiva elevada.

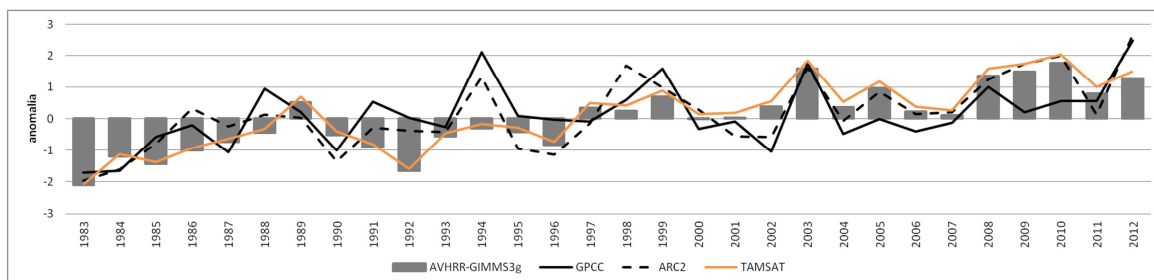


Figura 7.3. Anomalía anual del NDVI GIMMS3g y precipitación GPCC, ARC2 y Tamsat entre 1983 y 2012.

La regresión lineal entre los valores de precipitación y el NDVI se ha calculado utilizando dos conjuntos de datos temporales. En uno de los conjuntos sólo se han utilizado los datos de los meses de julio, agosto, septiembre y octubre (JASO), y se han dejado a un lado los de los meses de la estación seca. En el otro, se han utilizado los de todos los meses del año. Los datos de precipitación para los dos conjuntos son los de precipitación acumulada, mes actual más los dos anteriores.

La mejor correlación entre el NDVI y la precipitación se ha encontrado en los valores acumulados de precipitación (el mes al que nos referimos más los dos anteriores) de los meses JASO, y refuerza la hipótesis de que en ambientes semiáridos la vegetación está más asociada a la humedad del suelo como resultado de la precipitación acumulada en un periodo de tiempo previo que a la precipitación instantánea (Noel et al., 2006). Por ello, se ha decidido procesar exclusivamente los datos relativos a los cuatro meses de la temporada de lluvias (JASO), que son los meses en los que la vegetación alcanza su pico máximo y se inicia el fin de la temporada; a pesar de que esta situación puede no ser homogénea en toda la región y cambiar de un año a otro (Anyamba y Tucker, 2005; Huber et al., 2011).

El valor promedio de correlación con un nivel de significación del 95 % es de 0,37 para datos de GPCC, 0,35 para ARC2 y 0,36 para TAMSAT (Figura 7.4). Los valores más elevados definen prácticamente la extensión de las zonas del área de estudio clasificadas como semiáridas, donde la lluvia es un factor importante en el crecimiento de la vegetación. En cambio, en las zona del sur, con una vegetación mucho más densa, la correlación es muy baja o bien no es estadísticamente significativa, ya que la época de lluvias suele ser más larga y por tanto la humedad del suelo se mantiene durante un periodo mucho más largo, además de que existe una cobertura vegetal permanente y tupida. La dinámica de la vegetación en la zona del delta interior del río Níger en Malí no es estadísticamente significativa, ya que la gran llanura que ocupa el delta permanece inundada durante los 4 meses de la época de lluvias, y es al secarse cuando surge la vegetación.

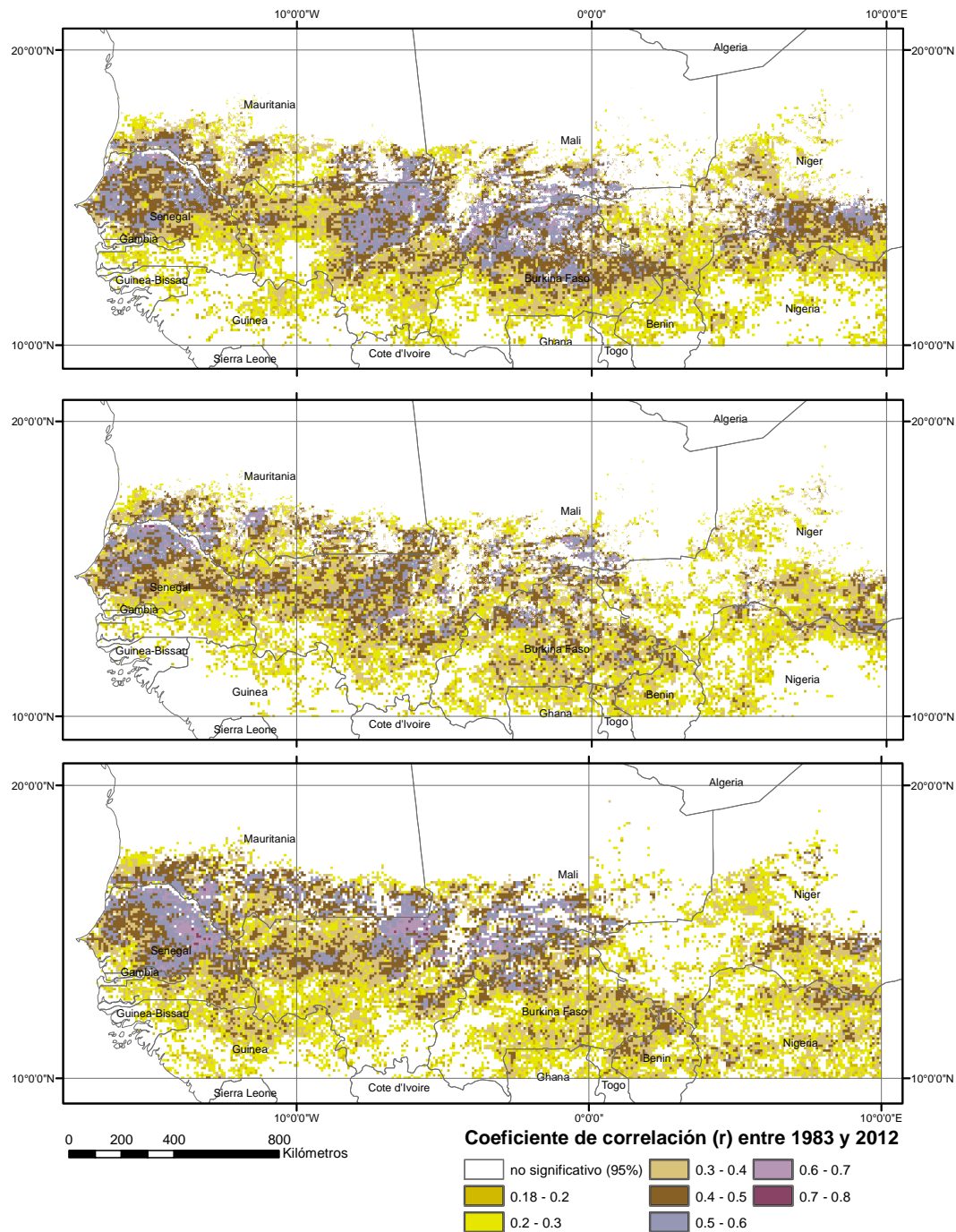


Figura 7.4. Coeficiente de correlación entre AVHRR-GIMMS3g y, de arriba abajo, GPCC, ARC2 y TAMSAT, durante los meses de JASO entre 1983 y 2012.

Los resultados encontrados en la regresión lineal (Figura 7.4) son coherentes con los hallados por otros autores (Herrmann et al., 2005; Huber, 2011). Aunque hay que destacar que la coincidencia se centra principalmente en la distribución espacial de los valores máximos y mínimos de la correlación, pero no en la cuantificación de la misma, donde otros autores encuentran valores de correlaciones superiores y las áreas de tendencia estadística son inferiores. Estas diferencias pueden ser debidas a que los datos de precipitación utilizados son diferentes, a que los valores de AVHRR no corresponden a la última versión del procesado por la unidad GIMMS o bien a que el área analizada en sus trabajos es mayor. De todos modos, con la misma metodología que en Huber et al. (2011) y con los mismos datos de precipitación, GPCP de 2,5° de resolución espacial, se han elaborado los mapas de correlación. Los

resultados son ligeramente superiores a los hallados en esta tesis, pero no coinciden con las altas correlaciones publicadas.

Las anomalías estandarizadas o z-scores (Figura 7.5) de cada uno de los cuatro meses, JASO, calculada respecto al mismo mes de 1983 a 2012, muestran que los valores negativos de la anomalía se producen principalmente en la primera década de los 30 años analizados; la segunda década se observa más irregular, se alternan años de anomalías negativas con anomalías positivas, y, en cambio, en la última década parece consolidarse un periodo constante de anomalías positivas, principalmente en los meses de agosto, septiembre y octubre.

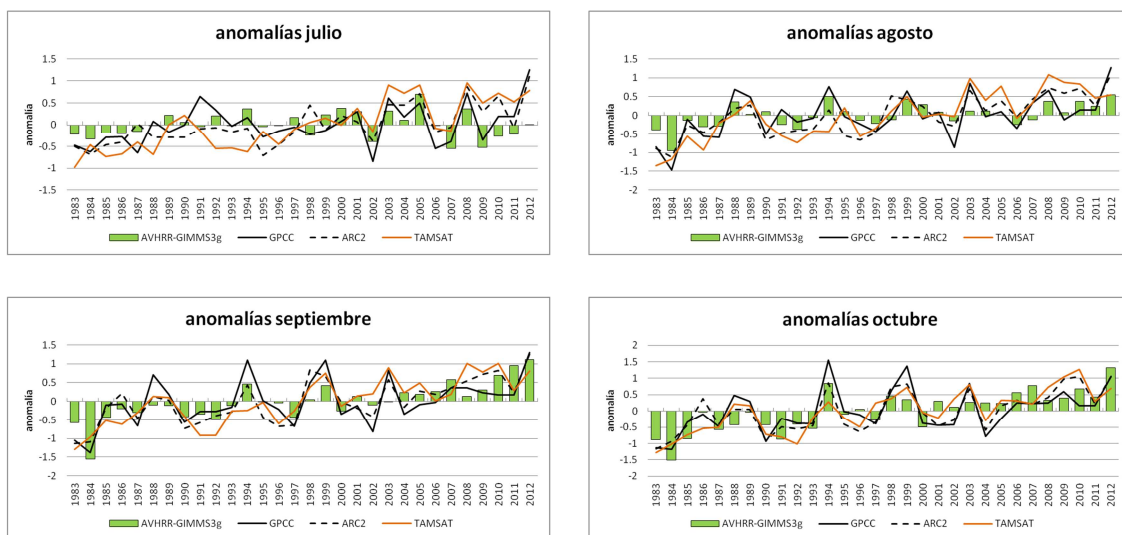


Figura 7.5. Anomalías para cada uno de los meses de JASO. Anomalías mensuales del NDVI AVHRR-GIMMS3g y precipitación acumulada (mes al que nos referimos más los dos anteriores).

Los meses de julio y agosto (Figura 7.5) siguen un patrón bastante regular en cuanto al valor de las anomalías de vegetación. No existe ningún año excepcional y en la última década se alternan anomalías positivas con negativas. La precipitación coincide en signo con las anomalías de vegetación aunque muestra valores más elevados.

Las anomalías de vegetación de septiembre y octubre (Figura 7.5) muestran una clara tendencia creciente, el valor mínimo se produce en 1984 y el máximo en 2012. Se observan dos periodos claramente diferenciados respecto al signo: la primera mitad de la época estudiada contiene la mayoría de tendencias negativas y en la segunda mitad todas las tendencias son positivas. La precipitación no sigue en todos los años el signo de la anomalía de la vegetación.

7.4 Comparación de la correlación basada en periodos de tiempo diferentes

La relación lineal entre AVHRR-GIMMS y los diferentes valores de precipitación se ha calculado para dos intervalos de tiempo distintos. El primero, de 1983 a 1997 (Figura 7.6), y el segundo, de 1998 a 2012 (Figura 7.7), dos periodos de 15 años cada uno. Las características de los archivos utilizados ha sido la misma, el NDVI mensual y la precipitación acumulada de 3 meses (los meses analizados han sido JASO). El objetivo es determinar si la correlación tiene el mismo valor promedio y, por tanto, si la relación es igual en los dos periodos de tiempo.

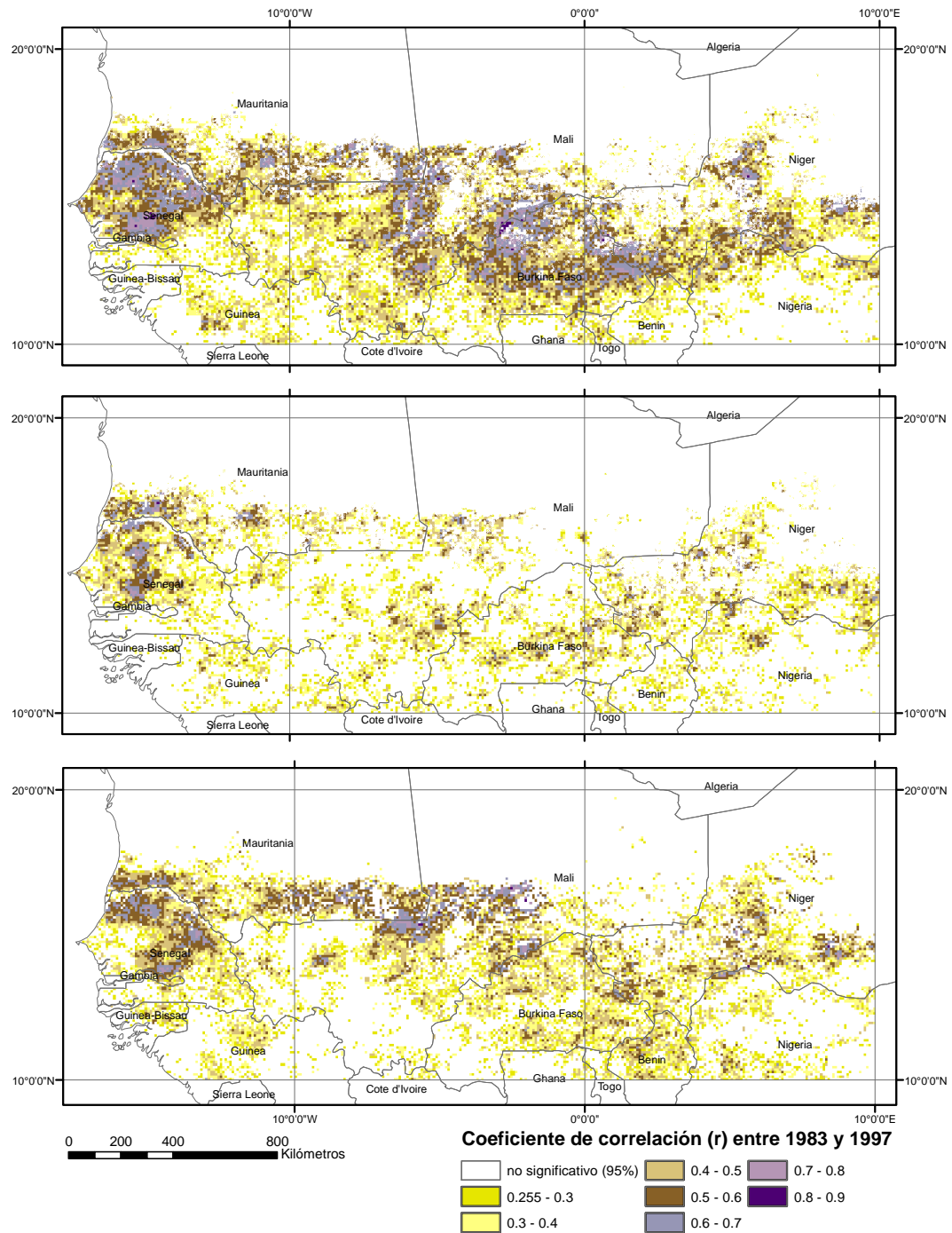


Figura 7.6. Coeficiente de correlación (r) de 1983 a 1997 de los meses de julio, agosto, septiembre y octubre entre AVHRR-GIMMS3g (variable dependiente) y, de arriba abajo, GPCC, ARC2 y TAMSAT.

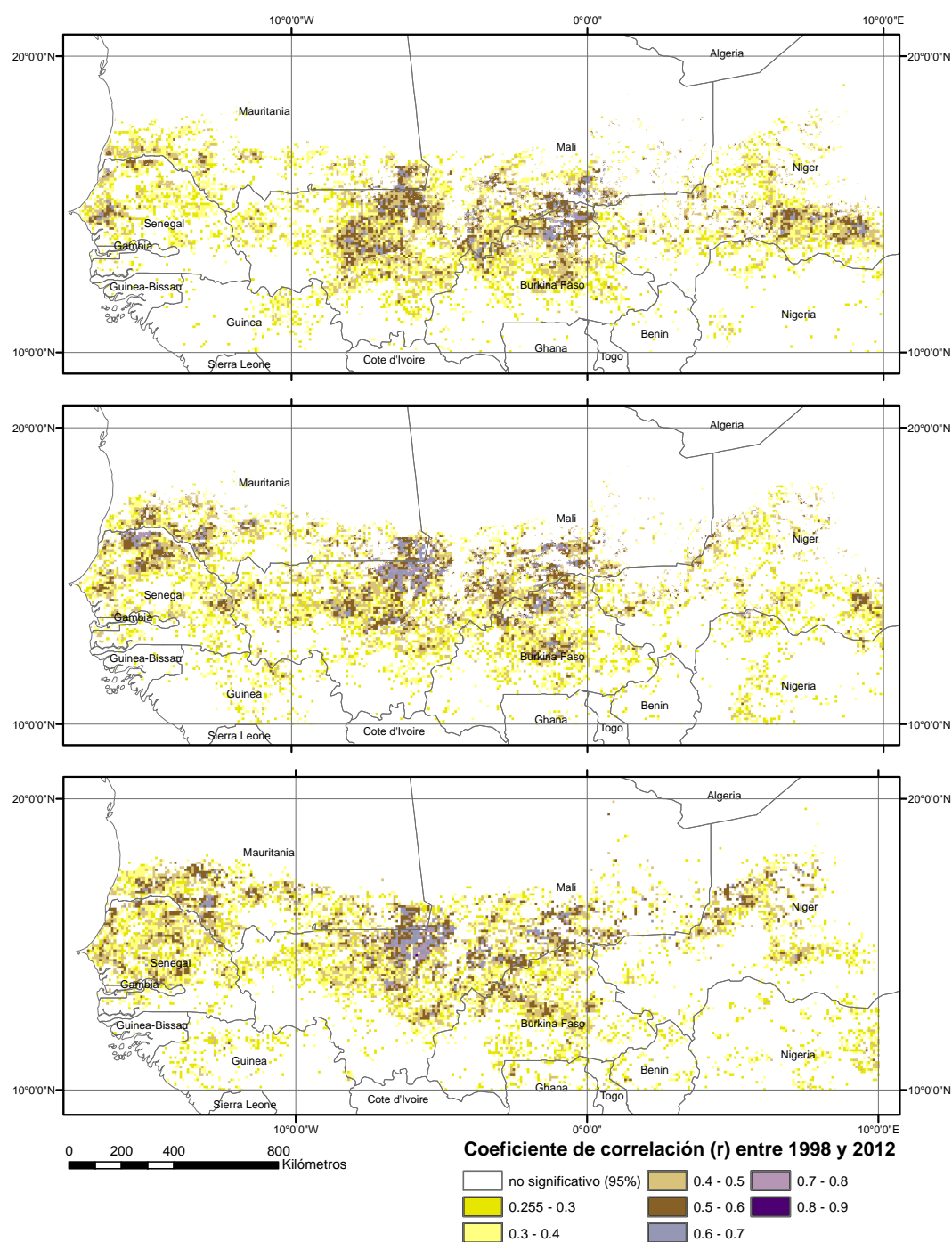


Figura 7.7. Coeficiente de correlación (r) de 1998 a 2012 de los meses de julio, agosto, septiembre y octubre entre AVHRR-GIMMS3g (variable dependiente) y, de arriba abajo, GPCC, ARC2 y TAMSAT.

En ambos periodos el coeficiente de correlación es ligeramente superior al que se ha encontrado para el periodo 1983-2012 (Tabla 7.1); esta diferencia se debe a la disminución de la superficie con un nivel de confianza del 95 %, que es considerablemente inferior en el periodo que va de 1998 a 2012.

Tabla 7.1. Coeficiente de correlación promedio y superficie (en %) con un nivel de confianza estadística del 95% para los periodos 1983-1997 y 1998-2012.

	Entre 1983 y 1997		Entre 1998 y 2012	
	Coeficiente de correlación	Superficie (%) con un 95 % de significación	Coeficiente de correlación	Superficie (%) con un 95 % de significación estadística
AVHRR GIMMS3g y GPCC	0,46	67,7	0,40	38,8
AVHRR GIMMS3g y ARC2	0,38	41,6	0,40	40,4
AVHRR GIMMS3g y TAMSAT	0,41	54,0	0,40	38,9

7.5 Tendencia y análisis espacial de los residuos

En este capítulo se ha calculado la regresión lineal entre datos de vegetación y precipitación, considerando el índice de vegetación como variable dependiente y la precipitación como variable independiente. Esta relación lineal entre las variables explica la dinámica de la vegetación en función de la precipitación; sin embargo hay que añadir que al tratarse de una relación lineal los residuos de la vegetación son independientes de la precipitación. Por lo tanto, la posible tendencia temporal estadísticamente significativa (95 %) en los residuos mostrará cambios en la producción vegetal que no están directamente relacionados con la precipitación.

Estas tendencias en los residuos pueden ser positivas o negativas y reflejan cambios en el uso del suelo (por ejemplo, nuevas tierras de cultivo o modificaciones en la tipología de la vegetación) o bien indican una cierta degradación del suelo (Dardel et al., 2014a). Aunque también puede ser debido a una subestimación o sobrestimación de la precipitación en determinadas zonas (Rojas et al., 2011).

La tendencia negativa de los residuos del NDVI se centra en la parte norte, Mauritania, Malí y Níger, y coincide en los tres resultados de los diferentes datos de precipitación. En Níger se muestra un aumento de la vegetación menor de lo que se esperaba en comparación con la tendencia de precipitación (Figura 7.8). En esta zona donde se ha detectado la tendencia negativa de los residuos, la vegetación predominante son pastizales seminaturales que están en gran medida controlados por la precipitación.

En la zona suroeste del área de estudio, en concreto en la franja que ocupan Senegal, Gambia, Guinea Bissau y Guinea, se observa una tendencia positiva del NDVI; en estas áreas los usos del suelo corresponden a bosques, arbustos y matorrales y la precipitación registrada por las tres fuentes está situada entre 800 y 1.500 mm/año de promedio. La existencia de residuos y la baja correlación podrían confirmar lo descrito por Martiny et al. (2006) y Rojas et al. (2011a), que constatan una relación lineal entre el NDVI y una precipitación comprendida entre los 200 y 600 mm/año en las zonas tropicales, y afirman que con cantidades superiores la relación entre las dos variables ya no es lineal.

Los valores positivos más elevados en la tendencia de los residuos del NDVI coinciden espacialmente con los que han obtenido otros autores en trabajos anteriores (Herrmann et al., 2005; Huber et al., 2011), aunque las áreas que fueron asignadas como estadísticamente significativas (95 %) no coinciden: en este trabajo la superficie de estudio es superior, especialmente en las zonas de vegetación más densa. Los motivos por los que se producen estas diferencias pueden ser el periodo diferente de tiempo que abarcan los datos y los mismos datos en sí, tanto por los valores de estimación de precipitación, que son diferentes, como por la versión utilizada del NDVI AVHRR GIMMS.

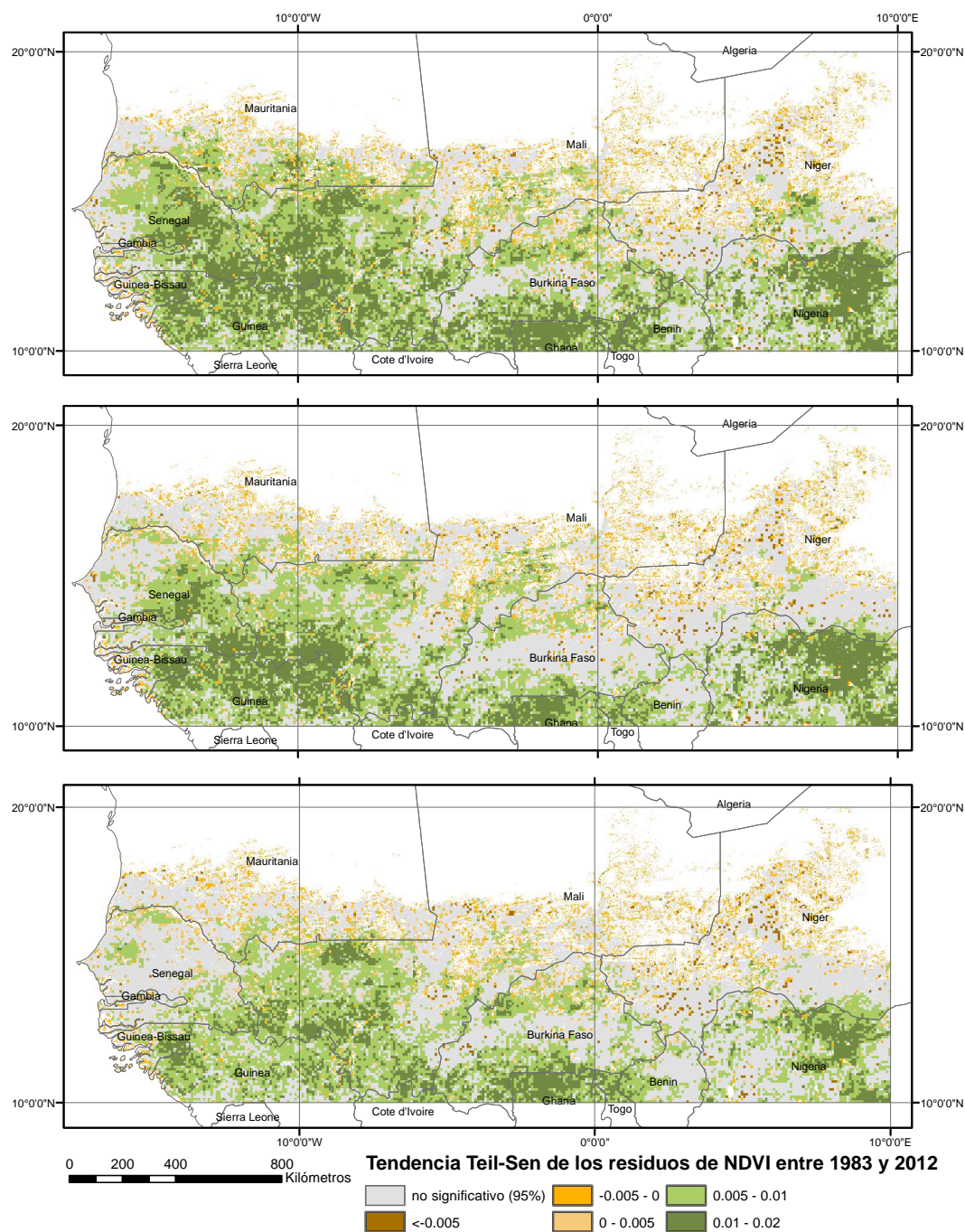


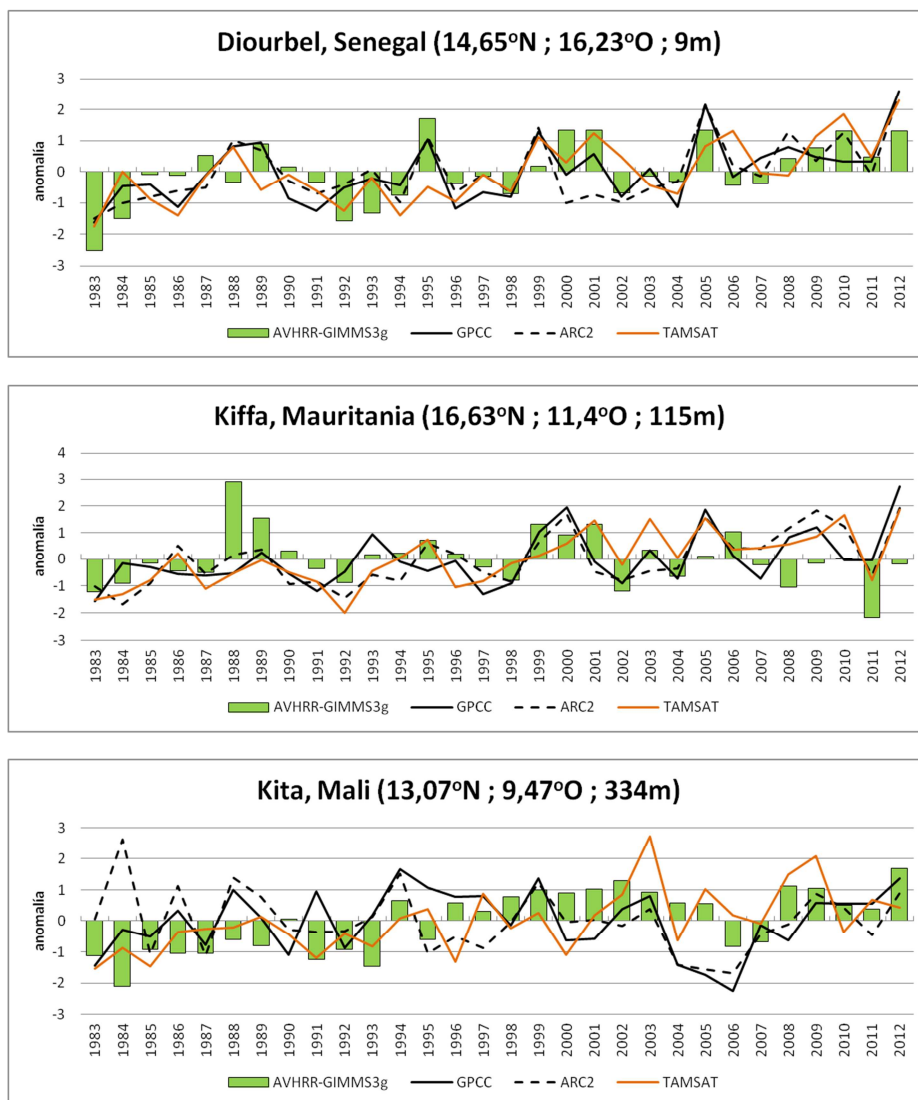
Figura 7.8. Tendencia de los residuos basados en la regresión lineal entre el NDVI (variable dependiente) y la precipitación (variable independiente) en, de arriba abajo, AVHRR-GIMMS3g y GPCC; AVHRR-GIMMS3g y ARC2, y AVHRR-GIMMS3g y TAMSAT. Se han utilizado datos mensuales del NDVI y de precipitación acumulada (3 meses, el que nos ocupa más los dos anteriores) para los meses de JASO durante el periodo 1983-2012.

7.6 Análisis de resultados en localizaciones concretas

Siguiendo con el mismo sistema que en capítulos anteriores, se ha analizado la dinámica de la vegetación en comparación con el régimen de lluvias en localizaciones concretas. Estos resultados muestran que el comportamiento de la vegetación no es homogéneo en todo el Sahel.

En los puntos situados en latitudes medias o muy bajas del área de estudio, como son Diourbel, Kita, Ouahigouya o Natitingou, se observa un periodo continuado de años de sequía marcados por las anomalías negativas del NDVI y la precipitación durante la primera década de estudio, la de 1980. En cambio, a partir de mediados de la década del 2000 ocurre todo lo contrario, se recupera la precipitación y con ello la vegetación. En el periodo intermedio, entre 1990 y 2002, la vegetación no se comporta, por lo que respecta a su dinámica, de forma homogénea en los puntos que se están comentando. Así, en Kita y Ouahigouya sí que se observa todo un periodo de recuperación de la precipitación; sin embargo, no pasa lo mismo en Diourbel, cerca de la costa atlántica, o en Natitingou, situada mucho más al sur, en una zona poco influida por el régimen de precipitación que determina el monzón.

Merecen una especial atención los puntos situados más al este, Tahoua y Maradi, que aunque comparten latitud con los otros puntos comentados, los datos que nos ofrecen revelan diferencias en el régimen de precipitación y la vegetación: mientras que en los otros puntos se observa una recuperación prácticamente total en la última década, tanto por lo que respecta a la precipitación como a la vegetación, en estos dos puntos se continúan sucediendo anomalías negativas de vegetación en los últimos años del análisis. Estos resultados concuerdan con los hallados por Nicholson (2005), que concluye que la recuperación de la precipitación en las últimas décadas es más evidente en la zona oeste del Sahel y no tanto en el este.



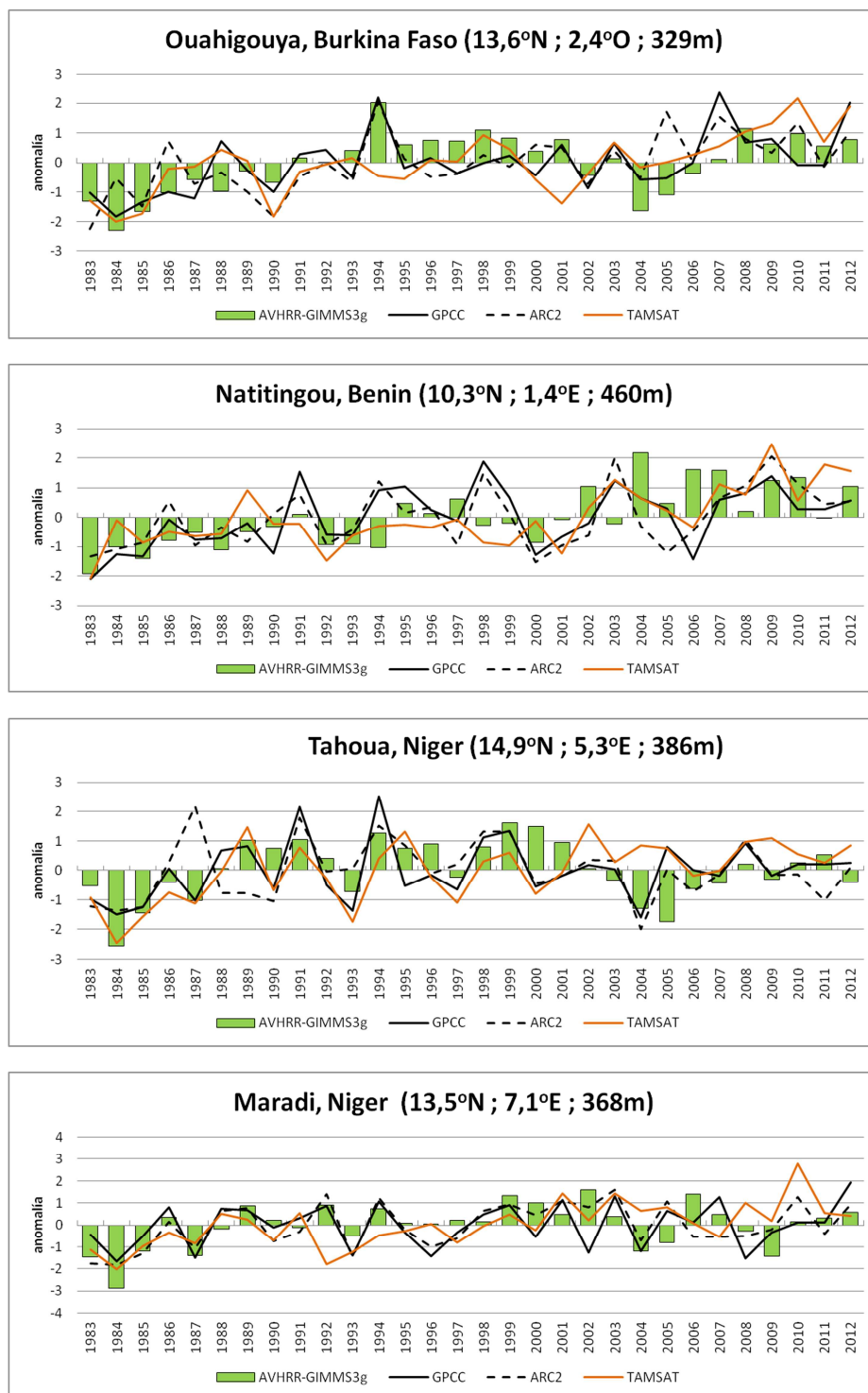


Figura 7.9. Anomalías del NDVI AVHRR GIMMS3g y de la precipitación GPCC, ARC2, TAMSAT entre 1983 y 2012.

7.7 Conclusiones

En este capítulo se ha analizado la relación existente entre la precipitación y la vegetación, a través del NDVI, buscando patrones temporales y espaciales del NDVI explicables a partir de la variación interanual de la precipitación entre 1983 y 2012.

Los datos de vegetación utilizados en el análisis han sido extraídos de la nueva versión del NDVI AVHRR GIMMS3g. Los valores de precipitación se han obtenido de tres fuentes distintas.

Por un lado, datos GPCC, que proceden exclusivamente de estaciones meteorológicas y que han sido interpolados para poder cubrir todo el territorio; por otro lado, los datos ARC2, que se obtienen a través de medidas de satélite pero que se calibran con valores de estaciones meteorológicas, y, por último, los datos TAMSAT, que proceden exclusivamente de medidas de satélite.

El análisis lineal entre el NDVI y las diferentes fuentes de precipitación debería proporcionar resultados similares entre sí, pero no es esto lo que sucede. La precipitación es una de las variables climáticas más difíciles de representar espacialmente y, tal y como se ha observado en el capítulo 5 «Análisis de los datos de precipitación», los tres conjuntos de datos seleccionados para este análisis no coinciden ni cuantitativa ni espacial ni temporalmente entre sí.

Por otro lado, la precipitación no es la única variable necesaria en el desarrollo de la vegetación, puesto que influyen otros factores ambientales locales, como la temperatura ambiente o el tipo de suelo y las propiedades del mismo (capacidad de infiltración, retención de agua...), variables que no se pueden medir en grandes extensiones.

También hay que tener en cuenta la resolución espacial de los datos de partida como factor limitante del análisis. Los valores del NDVI tienen una resolución espacial de 8 km aproximadamente. En una superficie de 8 x 8 km existe una gran variedad de tipologías de cubiertas vegetales, que probablemente habrán ido cambiando a lo largo del tiempo por la creciente presión humana y la variabilidad climática. Con esta resolución de trabajo es muy difícil recoger patrones locales de vegetación o la introducción de mejoras en las técnicas de cultivo.

De todos modos, los mejores resultados de la regresión lineal entre las variables precipitación y vegetación de los meses JASO entre 1983 y 2012 se producen en las zonas semiáridas situadas más al norte, que corresponden mayoritariamente a cubiertas de cultivos y zonas de pasturas, donde la precipitación anual se sitúa en valores comprendidos entre los 400 y los 700 mm/año. Las áreas situadas al sur o bien no son estadísticamente significativas o bien su coeficiente de correlación es muy bajo.

En cambio, los valores más elevados y positivos de los residuos obtenidos con la regresión lineal se encuentran en las zonas situadas más al sur. Esto indica que la vegetación aumenta independientemente de la cantidad de precipitación recibida o bien que los valores de precipitación están subestimados. En las zonas situadas más al norte, donde prácticamente desaparece la vegetación, los residuos son negativos, lo que revela una ligera degradación del suelo o una sobrestimación de la precipitación.

Todo esto pone de relieve la importancia de revisar la correspondencia lineal entre la precipitación y la vegetación lineal para umbrales inferiores a los 1.000 mm/año, tal y como se suponía. Sin embargo, para comprender mejor la tendencia de la vegetación provocada por otros factores distintos a la disponibilidad de agua y para evaluar los posibles cambios del tipo de vegetación, se necesitan estudios con sensores de mejor resolución espacial.

CAPÍTULO 8 Conclusiones y futuras líneas de trabajo

En este capítulo se sintetizan las conclusiones expuestas en los capítulos de análisis y también se exponen futuras líneas de trabajo.

8.1 Conclusiones generales

Las técnicas de observación por satélite de la Tierra han permitido, en las últimas cuatro décadas, realizar un seguimiento de los grandes cambios medioambientales que se han producido en el Sahel, uno de los ecosistemas más frágiles del planeta. La complejidad de la interacción antropogénica sobre dicho ecosistema, junto con la escasez y la alta variabilidad de la precipitación, además de unos usos del suelo altamente heterogéneos, convierten la monitorización del área en un gran reto. Por suerte, cada vez hay disponibles más datos procedentes de los programas de observación de la Tierra, la mayoría de ellos de forma gratuita, con una mayor resolución espacial y temporal así como espectral, que han permitido explorar nuevas aplicaciones y abordar la falta de información en extensas áreas del planeta.

En esta tesis se ha estudiado el impacto de la variabilidad climática y la influencia que esta ha tenido sobre la dinámica de la vegetación en el Sahel en el periodo comprendido entre 1983 y 2012, a partir de imágenes procedentes de satélite. En concreto, se ha estudiado la variabilidad de la precipitación y de la vegetación, cada una por separado, y posteriormente se ha analizado el vínculo entre las dos variables. La variabilidad de la precipitación se ha analizado por medio de varias series temporales de precipitación, con el objetivo de encontrar aquella que proporcione menor incertidumbre sobre la medida. Para el análisis de la vegetación se ha utilizado la serie temporal del NDVI AVHRR GIMMS3g, y, con el objetivo de otorgarle calidad, puesto que se trata de la única serie que permite estudiar la dinámica de la vegetación en los 30 años que abarca el estudio, se ha comparado con los valores del NDVI de los sensores VEGETATION y MODIS para el periodo de tiempo en el que han coincidido, de 2000 a 2012.

En primer lugar, se han analizado los diferentes conjuntos de datos de precipitación más significativos en la zona. Como conjunto de validación, se han utilizado los valores del GPCC, que han sido elaborados a partir de valores de precipitación mensuales procedentes de

estaciones meteorológicas, y que permiten estudiar de forma continuada la precipitación global desde el año 1900 hasta la actualidad con una cobertura global y una resolución espacial de 0,5°. Estos datos han sido utilizados en la elaboración de las conclusiones de los últimos informes de evaluación publicados por el IPCC.

La verificación de la calidad de los datos de validación, GPCC, se ha realizado comparándolos con datos de estaciones meteorológicas, con el conjunto CRU y el SRI. Los valores procedentes de las estaciones meteorológicas, que deberían destacar por ser los más fiables, no lo son en el Sahel, a causa de la escasez y distribución de las estaciones, y por la discontinuidad en las series temporales, especialmente para la década de 1990; aun así, se ha considerado que era interesante comparar este conjunto con los valores GPCC y CRU. El resultado de la comparación ha establecido que estos valores GPCC son coherentes con los datos de las estaciones meteorológicas, CRU y SRI, y válidos para ser utilizados como conjunto de validación.

En la última década, se han puesto en órbita nuevos sensores que permiten obtener valores de precipitación con más precisión; por este motivo se han comparado con los datos de validación, GPCC, seis algoritmos que proporcionan estimaciones de precipitación. El análisis se ha efectuado para el periodo de tiempo en el que todos coinciden, de 2001 a 2012, y los sensores son: ARC2, TAMSAT, RFE2, TRMM 3B42, TRMM 3B43 y GPCC-1dd. Los resultados obtenidos confirman las conclusiones de trabajos anteriores sobre la misma región (Gosset et al., 2013; Jobard et al., 2011; Pierre et al., 2011; Roca et al., 2010), los productos de última generación reproducen las principales características de la dinámica de precipitación con un grado de concordancia entre moderado y alto en las áreas que muestran una significación estadística del 95 %. Los productos que se asemejan más al conjunto de validación son: ARC2, RFE2, TRMM 3B42 y TRMM 3B43. Por lo tanto, los datos ARC2 con más de 30 años de observaciones, conjuntamente con GPCC y TAMSAT, son adecuados para estudiar la dinámica de la precipitación en las últimas décadas, y los productos RFE2, TRMM 3B42 y TRMM 3B43 sirven para poder continuar con los estudios en el futuro. Se verifica la hipótesis de trabajo número 1.

A partir de los datos de precipitación GPCC, ARC2 y TAMSAT se ha podido estudiar la dinámica de la precipitación entre 1983 y 2012, 30 años en total. Los tres conjuntos de datos ponen de manifiesto la recuperación de la precipitación, aunque la tendencia no es igual para los tres. Mientras que los valores ARC2 recogen una cantidad de precipitación anual superior a los otros dos conjuntos, una tendencia anual más elevada y un valor máximo para toda la serie situado en el año 2012, los valores anuales de GPCC son inferiores respecto a los obtenidos en las otras dos series, y la tendencia es ligeramente positiva; esto puede ser debido a la disminución progresiva de estaciones meteorológicas, con lo cual el algoritmo de interpolación tiene muy pocos valores de entrada para una superficie muy extensa. El aumento de precipitación observado no es constante en el tiempo, sino que es superior en los últimos quince años.

El comportamiento interanual de la precipitación también ha sufrido variaciones a lo largo de 30 años: el aumento de la precipitación ahora se concentra en los meses de julio y, especialmente, agosto, y la tendencia en los meses de junio y septiembre, aunque positiva, es mucho más suave. Esto indica que, efectivamente, llueve más pero durante un periodo de tiempo más corto. Algunos autores han estudiado los valores de precipitación diaria y han hallado que el número de días de lluvia no ha aumentado respecto a los años de sequía, sin embargo la intensidad media de la precipitación diaria sí que ha aumentado (Giannini et al., 2013). Paralelamente, se ha observado en la última década un aumento de los sucesos extremos de precipitación (OXFAM, 2012; Reuters, 2013), lo cual es objeto de estudio de varios autores (Panthou et al., 2012, 2014; Tschakert et al., 2010).

En resumen, las precipitaciones en el Sahel han mostrado cierto grado de recuperación desde las devastadoras sequías en las décadas de 1970 y 1980. Sin embargo, las características del régimen de lluvia parecen haber cambiado; se abre un gran número de incógnitas sobre el comportamiento futuro de la precipitación en el Sahel.

El estudio de la dinámica de la vegetación ha sido posible gracias al diseño de nuevos sensores más precisos que proporcionan mediciones biofísicas destinadas a abordar cuestiones relacionadas con el cambio climático global. A los valores del NDVI procedentes de AVHRR GIMMS3g, con más de 30 años de datos, se les suma la nueva generación de sensores capaces de producir valores del NDVI de mayor calidad, entre los cuales se encuentran el VEGETATION, en los satélites SPOT, y los MODIS, en los satélites Terra y Aqua. Se verifica la hipótesis de trabajo número 2.

Los datos del NDVI procedentes del sensor AVHRR en su versión GIMMS3g están disponibles desde 1981 hasta la actualidad y ofrecen cobertura global con una resolución espacial de 8 km y temporal de 15 días. Se ha estudiado la precisión de estos datos comparándolos con valores del NDVI procedentes de SPOT-VGT, que son una composición de 10 días (S10), y el producto MOD13A2, de resolución temporal de 16 días, ambos con una medida de celda de 1 km², para el periodo de tiempo en el que coinciden los tres conjuntos de datos, del año 2000 al 2012.

La dinámica de la vegetación en el periodo de tiempo en que han coincidido los tres sensores no muestra patrones idénticos en la distribución espacial y temporal del NDVI. Se observa un aumento muy considerable de la vegetación en los 30 años estudiados en el conjunto SPOT-VGT, especialmente del meridiano 0° hacia el oeste, y no ocurre lo mismo con los otros dos conjuntos, incluso se constata una disminución de la vegetación, más elevada en el conjunto AVHRR GIMMS3g, a partir del meridiano 0° en dirección este, sobre todo en áreas concretas de Nigeria y Níger.

Los resultados revelan discrepancias entre los valores del NDVI AVHRR GIMMS3g y los datos de mayor resolución espacial, SPOT-VGT y MOD13A2. Estas diferencias pueden originarse en el procesado de los datos, en particular en el método de calibración del sensor, y en la detección de la cubierta afectada por nubes. Otro de los factores que puede influir en las discrepancias son los diferentes anchos espectrales de las bandas correspondientes al rojo y al infrarrojo cercano. Por otro lado, ha habido cambios en los satélites que contienen los sensores: hay que destacar la sustitución del sensor VGT1 en el SPOT4 por el VGT2 en el SPOT5, en el año 2003, que ha implicado un cambio en las respuestas espectrales de los canales 1 y 2. Con estas premisas se cree que el sensor MODIS es el futuro para el análisis de la dinámica de la vegetación y, por lo tanto, hay que entender muy bien la relación entre él y el sensor AVHRR GIMMS3g. El sensor VEGETATION no es operativo desde el mes de mayo de 2014 y ha sido sustituido por el satélite PROBA-V, que empezó a ofrecer imágenes del NDVI en octubre de 2013 con cobertura global y una resolución espacial de 1 km y 300 m.

Los resultados del análisis realizado entre 1982 y 2012 a partir de los datos AVHRR GIMMS3g han evidenciado un aumento de la vegetación durante el periodo estudiado prácticamente en toda la zona de estudio a excepción de algunas áreas en Níger, donde ha disminuido. El comportamiento estacional de la vegetación indica un aumento de la vegetación, pero un retraso en el momento en el que se produce el pico máximo de la misma. Este fenómeno también se ha observado en el análisis individualizado de los meses en los que se produce la máxima actividad de la vegetación. Por ejemplo, en los meses en los que se inicia la actividad fotosintética de la vegetación, de mayo a julio, se percibe que no existe ningún tipo de tendencia y, en cambio, de agosto a octubre se constata un aumento continuado de la vegetación desde inicios de la década de 1990 y con un máximo en el año 2012. Estos datos se corresponden con los observados en el comportamiento de la precipitación. Se verifica la hipótesis de trabajo 2.

Para finalizar, se ha analizado el comportamiento de la vegetación respecto a la precipitación en el periodo comprendido entre 1983 y 2012, 30 años en total. Hay que mencionar que la precipitación no es la única variable necesaria en el desarrollo de la vegetación, puesto que influyen otros factores ambientales. En el análisis se han comparado los valores del NDVI de AVHRR GIMMS3g con tres conjuntos de precipitación con características diferentes: los valores GPCC, elaborados exclusivamente con datos de estaciones meteorológicas; ARC2, procedentes de satélites y calibrados con datos de las estaciones meteorológicas, y TAMSAT, obtenidos a partir de datos de satélite, pero calibrados en función de la situación espacial de la celda. Los resultados han proporcionado una buena correlación en las zonas semiáridas donde la precipitación anual se sitúa entre los 400 y los 700 mm/año y que corresponde mayoritariamente a cubiertas de cultivos y zonas de pasturas. Ahora bien, estos valores de correlación no son homogéneos en todo el periodo de estudio, se han obtenido valores de correlación mayores durante los primeros quince años y algo inferiores en los últimos quince. Se verifica la hipótesis de trabajo 3.

En las áreas situadas más al sur, la vegetación en relación con la precipitación no muestra prácticamente ningún grado de significación estadística o bien su coeficiente de correlación es muy bajo. Los residuos de la correlación en estas zonas son positivos, lo cual indica que la vegetación aumenta independientemente de la cantidad de precipitación recibida o bien que los valores de precipitación están subestimados. Todo esto pone de relieve la importancia de revisar la correspondencia entre la precipitación y la vegetación para umbrales inferiores a los 1.000 mm/año. En todo caso, para comprender mejor la tendencia de la vegetación provocada por otros factores distintos a la disponibilidad de agua y para evaluar los posibles cambios del tipo de vegetación, se necesitaría trabajar con sensores de mejor resolución espacial.

8.2 Futuras líneas de trabajo

Durante el desarrollo de esta tesis han ido apareciendo líneas de investigación que se han ido perfilando a medida que se llegaba al final, y que permitirán comprender mejor algunos de los resultados obtenidos en este trabajo.

Uno de los puntos interesantes en el que profundizar son las causas que producen una demora en el inicio de la época de lluvias. Asociado a este fenómeno, que no es homogéneo en toda la región, se ha evidenciado un retraso en el momento en el cual se produce el pico máximo de vegetación en la estación. Algunos expertos apuntan a que los motivos pueden encontrarse en oscilaciones climáticas a escala global. La comprensión de cómo afectan o no los índices climáticos sobre la vegetación puede mejorar el análisis estacional y la planificación agrícola.

Los índices climáticos y patrones de variabilidad de baja frecuencia o teleconexiones más usuales en los estudios de variabilidad y cambio climático, y que se utilizarían para monitorizar su influencia sobre la dinámica, tanto de la precipitación como de la vegetación en el Sahel, son: El Niño - Oscilación del Sur (*El Niño Southern Oscillation*, ENSO), que es el patrón de teleconexión más conocido y global; la Oscilación del Atlántico Norte (*North Atlantic Oscillation*, NAO), el Dipolo del Océano Índico (*Indian Ocean Dipole*, IOD) y la Oscilación Decenal del Pacífico (*Pacific Decadal Oscillation*, PDO).

Otra de las líneas de trabajo que ha surgido durante la realización de la tesis está relacionada con los nuevos satélites que permiten monitorizar la humedad del suelo. La humedad del suelo es una variable climática fundamental y un elemento esencial en el crecimiento de la vegetación, que está ligada a dos desastres climáticos: las inundaciones y las sequías. Los suelos saturados no pueden absorber agua adicional, lo cual origina, en caso de precipitación, un aumento de la escorrentía superficial, que en algunas ocasiones se traduce en inundaciones. Por el contrario, la deficiencia de agua en el suelo produce sequía agrícola, que

puede ser observada antes que las plantas sufran estrés hídrico. La monitorización de la humedad del suelo puede ayudar a mejorar la predicción tanto de posibles inundaciones como de las sequías. En consecuencia, un buen conocimiento de la humedad del suelo, especialmente en las zonas áridas y semiáridas del planeta, dará lugar a información sobre disponibilidad de agua, y esta información, junto con otra sobre la fenología, puede mejorar las alertas sobre hambrunas y crisis humanitarias.

BIBLIOGRAFÍA

- Ackerley, D., Booth, B. B. B., Knight, S. H. E., Highwood, E. J., Frame, D. J., Allen, M. R., Rowell, D. P. (2011). Sensitivity of Twentieth-Century Sahel Rainfall to Sulfate Aerosol and CO₂ Forcing. *Journal of Climate*, 24(19), 4999–5014.
- Aitkenhead, M. (2014). SPOT-VEGETATION – 15 years of success: what's next? *International Journal of Remote Sensing*, 35(7), 2397–2401.
- Alcaraz-Segura, D., Chuvieco, E., Epstein, H. E., Kasischke, E. S., Trishchenko, A. (2010). Debating the greening vs. browning of the North American boreal forest: differences between satellite datasets. *Global Change Biology*, 16(2), 760–770.
- Amogu, O., Descroix, L., Yéro, K. S., Le Breton, E., Mamadou, I., Ali, A., ... Belleudy, P. (2010). Increasing River Flows in the Sahel? *Water*, 2(2), 170–199.
- Anyamba, A., Small, J., Tucker, C., Pak, E. (2014). Thirty-two Years of Sahelian Zone Growing Season Non-Stationary NDVI3g Patterns and Trends. *Remote Sensing*, 6(4), 3101–3122.
- Anyamba, A., Tucker, C. J. (2005). Analysis of Sahelian vegetation dynamics using NOAA-AVHRR NDVI data from 1981–2003. *Special Issue on The “Greening” of the Sahel Special Issue on The “Greening” of the Sahel*, 63(3), 596–614.
- Arkin, P. A., Joyce, R., Janowiak, J. E. (1994). The estimation of global monthly mean rainfall using infrared satellite data: The GOES precipitation index (GPI). *Remote Sensing Reviews*, 11(1-4), 107–124.
- Balme, M., Vischel, T., Lebel, T., Peugeot, C., Galle, S. (2006). Assessing the water balance in the Sahel: Impact of small scale rainfall variability on runoff: Part 1: Rainfall variability analysis. *Water Resources in Regional Development: The Okavango River*, 331(1–2), 336–348.
- Beck, H. E., McVicar, T. R., van Dijk, A. I. J. M., Schellekens, J., de Jeu, R. a. M., Bruijnzeel, L. A. (2011). Global evaluation of four AVHRR–NDVI data sets: Intercomparison and

-
- assessment against Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, 115(10), 2547–2563.
- Becker, a., Finger, P., Meyer-Christoffer, a., Rudolf, B., Schamm, K., Schneider, U., Ziese, M. (2012). A description of the global land-surface precipitation data products of the Global Precipitation Climatology Centre with sample applications including centennial (trend) analysis from 1901â€‘present. *Earth System Science Data Discussions*, 5(2), 921–998.
- Bégué, A., Vintrou, E., Ruelland, D., Claden, M., Dessay, N. (2011). Can a 25-year trend in Soudano-Sahelian vegetation dynamics be interpreted in terms of land use change? A remote sensing approach. *Special Issue on The Politics and Policy of Carbon Capture and Storage*, 21(2), 413–420.
- Bi, J., Xu, L., Samanta, A., Zhu, Z., Myneni, R. (2013). Divergent Arctic-Boreal Vegetation Changes between North America and Eurasia over the Past 30 Years. *Remote Sensing*, 5(5), 2093–2112.
- Biasutti, M. (2013). Forced Sahel rainfall trends in the CMIP5 archive. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(4), 1613–1623.
- Biasutti, M., Giannini, A. (2006). Robust Sahel drying in response to late 20th century forcings. *Geophysical Research Letters*, 33(11), L11706.
- Biasutti, M., Held, I. M., Sobel, a. H., Giannini, a. (2008). SST Forcings and Sahel Rainfall Variability in Simulations of the Twentieth and Twenty-First Centuries. *Journal of Climate*, 21(14), 3471–3486.
- Boschetti, M., Nutini, F., Brivio, P. A., Bartholomé, E., Stroppiana, D., Hoscilo, A. (2013). Identification of environmental anomaly hot spots in West Africa from time series of NDVI and rainfall. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 78, 26–40.
- Brandt, M., Romankiewicz, C., Spiekermann, R., Samimi, C. (2014). Environmental change in time series – An interdisciplinary study in the Sahel of Mali and Senegal. *Journal of Arid Environments*, 105, 52–63.
- Brooks, N. (2004). *Drought in the African Sahel: Long term perspectives and future prospects* (No. Working Paper. 61). Tydall Centre for Climate Change Research (Vol. Working pa).
- Brooks, N. (2006a). Climate change, drought and pastoralism in the Sahel. *Discussion Note for the World Initiative on Sustainable Pastoralism*, IUCN.
- Brooks, N. (2006b). Cultural responses to aridity in the Middle Holocene and increased social complexity. *Quaternary International*, 151(1), 29–49.
- Brown, M. E., de Beurs, K. M. (2008). Evaluation of multi-sensor semi-arid crop season parameters based on NDVI and rainfall. *Earth Observations for Terrestrial Biodiversity and Ecosystems Special Issue*, 112(5), 2261–2271.
- Brown, M. E., de Beurs, K., Vrieling, A. (2010). The response of African land surface phenology to large scale climate oscillations. *Remote Sensing of Environment*, 114(10), 2286–2296.
- Brown, M. E., Pinzon, J. E., Didan, K., Morisette, J. T., Tucker, C. J. (2006). Evaluation of the consistency of long-term NDVI time series derived from AVHRR, SPOT-vegetation, SeaWiFS, MODIS, and Landsat ETM+ sensors. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 44(7), 1787–1793.

- Camberlin, P., Martiny, N., Philippon, N., Richard, Y. (2007). Determinants of the interannual relationships between remote sensed photosynthetic activity and rainfall in tropical Africa. *Remote Sensing of Environment*, 106(2), 199–216.
- Campbell, J. B., Wynne, R. H. (2011). *Introduction to REMOTE SENSING* (5th ed.). New York: Guildford.
- Capecchi, V., Crisci, A., Lorenzo, G., Maselli, F., Vignaroli, P. (2008). Analysis of NDVI trends and their climatic origin in the Sahel 1986–2000. *Geocarto International*, 23(4), 297–310.
- CILSS. (2012). Comité permanent Inter-Etats de Lutte contre la Sécheresse dans le Sahel. Retrieved from <http://www.cilss.bf/>
- CISL RDA: World Monthly Surface Station Climatology. (1981). Retrieved from <http://rda.ucar.edu/datasets/ds570.0/>
- Clark, D., Xue, Y., Harding, R., Valdes, P. (2001). Modeling the impact of land surface degradation on the climate of tropical North Africa. *Journal of Climate*, (1995), 1809–1822.
- Cook, B., Pau, S. (2013). A Global Assessment of Long-Term Greening and Browning Trends in Pasture Lands Using the GIMMS LAI3g Dataset. *Remote Sensing*, 5(5), 2492–2512.
- Courel, M. F., Kandel, R. S., Rasool, S. I. (1984). Surface albedo and the Sahel drought. *Nature*, 307(5951), 528–531.
- Cracknell, A. P. (2001). The exciting and totally unanticipated success of the AVHRR in applications for which it was never intended. *Advances in Space Research*, 28(1), 233–240.
- Chamaille-Jammes, S., Fritz, H., Murindagomo, F. (2006). Spatial patterns of the NDVI–rainfall relationship at the seasonal and interannual time scales in an African savanna. *International Journal of Remote Sensing*, 27(23), 5185–5200.
- Chandler, R. E., Scott, E. M. (2011). *Statistical methods for trend detection and analysis in the environmental sciences*. Hoboken, N.J.: Wiley. doi:10.1002/9781119991571
- Charney, J. G. (1975). Dynamics of deserts and drought in the Sahel. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 101(428), 193–202.
- Charney, J., Quirk, W. J., Chow, S., Kornfield, J. (1977). A Comparative Study of the Effects of Albedo Change on Drought in Semi-Arid Regions. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 34(9), 1366–1385.
- Chuvieco, E. (2008). *Teledetección ambiental: la observación de la tierra desde el espacio* (Vol. 3^a, actua, p. 594). Madrid: Ariel.
- Dai, A., Lamb, P. J., Trenberth, K. E., Hulme, M., Jones, P. D., Xie, P. (2004). The recent Sahel drought is real. *International Journal of Climatology*, 24(11), 1323–1331.
- Dardel, C., Kergoat, L., Hiernaux, P., Grippa, M., Mougin, E., Ciais, P., Nguyen, C.-C. (2014a). Rain-Use-Efficiency: What it Tells us about the Conflicting Sahel Greening and Sahelian Paradox. *Remote Sensing*, 6(4), 3446–3474.
- Dardel, C., Kergoat, L., Hiernaux, P., Mougin, E., Grippa, M., Tucker, C. J. (2014b). Re-greening Sahel: 30years of remote sensing data and field observations (Mali, Niger). *Remote Sensing of Environment*, 140, 350–364.

-
- De Jong, R., de Bruin, S. (2012). Linear trends in seasonal vegetation time series and the modifiable temporal unit problem. *Biogeosciences*, 9(1), 71–77.
- De Jong, R., de Bruin, S., de Wit, A., Schaepman, M. E., Dent, D. L. (2011). Analysis of monotonic greening and browning trends from global NDVI time-series. *Remote Sensing of Environment*, 115(2), 692–702.
- Deronde, B., Debruyn, W., Gontier, E., Goor, E., Jacobs, T., Verbeiren, S., Vereecken, J. (2014). 15 years of processing and dissemination of SPOT-VEGETATION products. *International Journal of Remote Sensing*, 35(7), 2402–2420.
- Descroix, L., Mahé, G., Lebel, T., Favreau, G., Galle, S., Gautier, E., ... Sighomnou, D. (2009). Spatio-temporal variability of hydrological regimes around the boundaries between Sahelian and Sudanian areas of West Africa: A synthesis. *Journal of Hydrology*, 375(1-2), 90–102.
- Druyan, L. M. (2011). Studies of 21st-century precipitation trends over West Africa. *International Journal of Climatology*, 31(10), 1415–1424.
- Eastman, J. R., Sangermano, F., Machado, E. A., Rogan, J., Anyamba, A. (2013). Global Trends in Seasonality of Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), 1982–2011. *Remote Sensing*, 5(10), 4799–4818.
- Eklundh, L., Olsson, L. (2003). Vegetation index trends for the African Sahel 1982–1999. *Geophysical Research Letters*, 30(8), 1430.
- FAO. (2002). *World agriculture: towards 2015 / 2030. Summary report. Food and Agriculture Organization of the United Nations*. doi:10.1016/S0264-8377(03)00047-4
- FAO. (2011). Food and Agriculture Organization of the United Nations - for a world without hunger. Retrieved January 01, 2014, from www.faostat3.fao.org
- FAO. (2012). *The Food and Nutrition Crisis in the Sahel, Urgent action to support the resilience of vulnerable populations* (pp. 1–88). Rome, Italy.
- Fensholt, R., Nielsen, T. T., Stisen, S. (2006a). Evaluation of AVHRR PAL and GIMMS 10-day composite NDVI time series products using SPOT-4 vegetation data for the African continent. *International Journal of Remote Sensing*, 27(13), 2719–2733.
- Fensholt, R., Proud, S. R. (2012). Evaluation of Earth Observation based global long term vegetation trends — Comparing GIMMS and MODIS global NDVI time series. *Remote Sensing of Environment*, 119, 131–147.
- Fensholt, R., Rasmussen, K. (2011). Analysis of trends in the Sahelian “rain-use efficiency” using GIMMS NDVI, RFE and GPCP rainfall data. *Remote Sensing of Environment*, 115(2), 438–451.
- Fensholt, R., Rasmussen, K., Kaspersen, P., Huber, S., Horion, S., Swinnen, E. (2013). Assessing Land Degradation/Recovery in the African Sahel from Long-Term Earth Observation Based Primary Productivity and Precipitation Relationships. *Remote Sensing*, 5(2), 664–686.
- Fensholt, R., Rasmussen, K., Nielsen, T. T., Mbow, C. (2009). Evaluation of earth observation based long term vegetation trends — Intercomparing NDVI time series trend analysis consistency of Sahel from AVHRR GIMMS, Terra MODIS and SPOT VGT data. *Remote Sensing of Environment*, 113(9), 1886–1898.

- Fensholt, R., Sandholt, I. (2005). Evaluation of MODIS and NOAA AVHRR vegetation indices with in situ measurements in a semi arid environment. *International Journal of Remote Sensing*, 26(12), 2561–2594.
- Fensholt, R., Sandholt, I., Stisen, S. (2006b). Evaluating MODIS, MERIS, and VEGETATION vegetation indices using in situ measurements in a semiarid environment. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(7), 1774–1786.
- Fontaine, B., Roucou, P., Monerie, P.-A. (2011). Changes in the African monsoon region at medium-term time horizon using 12 AR4 coupled models under the A1b emissions scenario. *Atmospheric Science Letters*, 12(1), 83–88.
- Forkel, M., Carvalhais, N., Verbesselt, J., Mahecha, M., Neigh, C., Reichstein, M. (2013). Trend Change Detection in NDVI Time Series: Effects of Inter-Annual Variability and Methodology. *Remote Sensing*, 5(5), 2113–2144.
- Funk, C. C., Brown, M. E. (2006). Intra-seasonal NDVI change projections in semi-arid Africa. *Remote Sensing of Environment*, 101(2), 249–256.
- Galvao, L. S., Vitorello, I., Pizarro, M. A. (2000). An adequate band positioning to enhance NDVI contrasts among green vegetation, senescent biomass, and tropical soils. *International Journal of Remote Sensing*, 21(9), 1953–1960.
- Gardelle, J., Hiernaux, P., Kergoat, L., Grippa, M. (2010). Less rain, more water in ponds: a remote sensing study of the dynamics of surface waters from 1950 to present in pastoral Sahel (Gourma region, Mali). *Hydrology and Earth System Sciences*, 14(2), 309–324.
- Giannini, a, Salack, S., Lodoun, T., Ali, a, Gaye, a T., Ndiaye, O. (2013). A unifying view of climate change in the Sahel linking intra-seasonal, interannual and longer time scales. *Environmental Research Letters*, 8(2), 024010.
- Giannini, A. (2010). Mechanisms of Climate Change in the Semiarid African Sahel: The Local View. *Journal of Climate*, 23(3), 743–756.
- Giannini, A., Biasutti, M., Verstraete, M. M. (2008). A climate model-based review of drought in the Sahel: Desertification, the re-greening and climate change. *Climate Change and Desertification*, 64(3–4), 119–128.
- Giannini, A., Saravanan, R., Chang, P. (2003). Oceanic Forcing of Sahel Rainfall on Interannual to Interdecadal Time Scales. *Science*, 302(5647), 1027–1030.
- Gosset, M., Viarre, J., Quantin, G., Alcoba, M. (2013). Evaluation of several rainfall products used for hydrological applications over West Africa using two high-resolution gauge networks. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 139(673), 923–940.
- Govaerts, Y., Lattanzio, A. (2008). Estimation of surface albedo increase during the eighties Sahel drought from Meteosat observations. *Climate Change and Desertification*, 64(3–4), 139–145.
- Greene, A. M., Giannini, A., Zebiak, S. E. (2009). Drought return times in the Sahel: A question of attribution. *Geophysical Research Letters*, 36(12), L12701.
- Grimes, D. I. F., Pardo-Igúzquiza, E., Bonifacio, R. (1999). Optimal areal rainfall estimation using raingauges and satellite data. *Journal of Hydrology*, 222(1–4), 93–108.
- Haarsma, R. J., Selten, F. M., Weber, S. L., Kliphuis, M. (2005). Sahel rainfall variability and response to greenhouse warming. *Geophysical Research Letters*, 32(17), L17702.

-
- Haeseler, S. (2012). *Drought with subsequent floods in the area of Sahel in West Africa 2011 / 2012* (pp. 1–6).
- Harris, I., Jones, P. D., Osborn, T. J., Lister, D. H. (2013). Updated high-resolution grids of monthly climatic observations - the CRU TS3.10 Dataset. *International Journal of Climatology*, n/a–n/a.
- Hein, L. (2006). The impacts of grazing and rainfall variability on the dynamics of a Sahelian rangeland. *Journal of Arid Environments*, 64(3), 488–504.
- Hein, L., De Ridder, N. (2006). Desertification in the Sahel: a reinterpretation. *Global Change Biology*, 12(5), 751–758.
- Hein, L., de Ridder, N., Hiernaux, P., Leemans, R., de Wit, A., Schaepman, M. (2011). Desertification in the Sahel: Towards better accounting for ecosystem dynamics in the interpretation of remote sensing images. *Journal of Arid Environments*, 75(11), 1164–1172.
- Helsel, D. R., Frans, L. M. (2006). Regional Kendall Test for Trend. *Environmental Science & Technology*, 40(13), 4066–4073.
- Helldén, U., Tottrup, C. (2008). Regional desertification: A global synthesis. *Climate Change and Desertification*, 64(3–4), 169–176.
- Herrmann, S. M., Anyamba, A., Tucker, C. J. (2005). Recent trends in vegetation dynamics in the African Sahel and their relationship to climate. *Global Environmental Change*, 15(4), 394–404.
- Heumann, B. W., Seaquist, J. W., Eklundh, L., Jönsson, P. (2007). AVHRR derived phenological change in the Sahel and Soudan, Africa, 1982–2005. *Remote Sensing of Environment*, 108(4), 385–392.
- Hiernaux, P., Diarra, L., Trichon, V., Mougín, E., Soumaguel, N., Baup, F. (2009). Woody plant population dynamics in response to climate changes from 1984 to 2006 in Sahel (Gourma, Mali). *Surface Processes and Water Cycle in West Africa, Studied from the AMMA-CATCH Observing System*, 375(1–2), 103–113.
- Hill, J., Stellmes, M., Udelhoven, T., Röder, A., Sommer, S. (2008). Mediterranean desertification and land degradation: Mapping related land use change syndromes based on satellite observations. *Climate Change and Desertification*, 64(3–4), 146–157.
- Hirsch, R. M., Slack, J. R. (1984). A Nonparametric Trend Test for Seasonal Data With Serial Dependence. *Water Resources Research*, 20(6), 727–732.
- Hoaglin, D. C., Mosteller, F., Tukey, J. W. (2000). *Understanding robust and exploratory data analysis* (p. 447). New York: John Wiley.
- Holben, B. N. (1986). Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, 7(11), 1417–1434.
- Hountondji, Y. C., Sokpon, N., Ozer, P. (2006). Analysis of the vegetation trends using low resolution remote sensing data in Burkina Faso (1982–1999) for the monitoring of desertification. *International Journal of Remote Sensing*, 27(5), 871–884.
- Huber, S. (2011). Analysis of teleconnections between AVHRR-based sea surface temperature and vegetation productivity in the semi-arid Sahel. *Remote Sensing of Environment*.

- Huber, S., Fensholt, R., Rasmussen, K. (2011). Water availability as the driver of vegetation dynamics in the African Sahel from 1982 to 2007. *Global and Planetary Change*, 76(3–4), 186–195.
- Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E. ., Gao, X., Ferreira, L. . (2002). Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 83(1-2), 195–213.
- Huffman, G., Adler, R., Arkin, P. (1997). The global precipitation climatology project (GPCP) combined precipitation dataset. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 5–20.
- Huffman, G. J., Adler, R. F., Morrissey, M. M., Bolvin, D. T., Curtis, S., Joyce, R., ... Olume, V. (2001). Global Precipitation at One-Degree Daily Resolution from Multisatellite Observations. *Journal of Hydrometeorology*, 2(1), 36–50.
- Huffman, G. J., Bolvin, D. T., Nelkin, E. J., Wolff, D. B., Adler, R. F., Gu, G., ... Stocker, E. F. (2007). The TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA): Quasi-Global, Multiyear, Combined-Sensor Precipitation Estimates at Fine Scales. *Journal of Hydrometeorology*, 8(1), 38–55.
- Hulme, M. (2001). Climatic perspectives on Sahelian desiccation: 1973–1998. *Global Environmental Change*, 11(August 2000), 19–29.
- IPCC. (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. (T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, ... P. M. Midgley, Eds.). Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press. doi:10.1017/CBO9781107415324
- IPCC. (2014). Africa. In I. Niang, O. C. Ruppel, M. A. Abdrabo, A. Essel, C. Lennard, J. Padgham, ... L. L. White (Eds.), *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change* (pp. 1199–1265). Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press.
- IPCC, Christensen, J. ., Krishna Kumar, K., Aldrian, E., An, S.-I., Cavalcanti, I. F. A., ... Zhou, T. (2013). Climate Phenomena and their Relevance for Future Regional Climate Change. In T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, ... P. M. Midgley (Eds.), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (p. 1523). Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.: Cambridge University Press. Retrieved from <http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>
- Jamali, S., Seaquist, J., Eklundh, L., Ardö, J. (2014). Automated mapping of vegetation trends with polynomials using NDVI imagery over the Sahel. *Remote Sensing of Environment*, 141, 79–89.
- Janicot, S., Moron, V., Fontaine, B. (1996). Sahel droughts and Enso dynamics. *Geophysical Research Letters*, 23(5), 515–518.
- Janicot, S., Trzaska, S., Poccard, I. (2001). Summer Sahel-ENSO teleconnection and decadal time scale SST variations. *Climate Dynamics*, 303–320.
- Janowiak, J. E. (1988). An Investigation of Interannual Rainfall Variability in Africa. *Journal of Climate*, 1(3), 240–255.

-
- Jobard, I., Chopin, F., Berges, J. C., Roca, R. (2011). An intercomparison of 10-day satellite precipitation products during West African monsoon. *International Journal of Remote Sensing*, 32(9), 2353–2376.
- Kandji, S. T., Verchot, L., Mackensen, J. (2006). *Climate change and variability in the Sahel region: impacts and adaptation strategies in the agricultural sector* (World Agro.). Nairobi: UNEP.
- Karnieli, A., Gilad, U., Ponzet, M., Svoray, T., Mirzadinov, R., Fedorina, O. (2008). Assessing land-cover change and degradation in the Central Asian deserts using satellite image processing and geostatistical methods. *Journal of Arid Environments*, 72(11), 2093–2105.
- Kaspersen, P. S., Fensholt, R., Huber, S. (2011). A Spatiotemporal Analysis of Climatic Drivers for Observed Changes in Sahelian Vegetation Productivity (1982–2007). *International Journal of Geophysics*, 2011, 1–14.
- Kendall, M. G. (1975). *Rank Correlation Methods*. London: Charles Griffin.
- Kidd, C. (2001). Satellite rainfall climatology: a review. *International Journal of Climatology*, 21(9), 1041–1066.
- Kidd, C., Huffman, G. (2011). Global precipitation measurement. *Meteorological Applications*, 18(3), 334–353.
- Knauer, K., Gessner, U., Dech, S., Kuenzer, C. (2014). Remote sensing of vegetation dynamics in West Africa. *International Journal of Remote Sensing*, 35(17), 6357–6396.
- Kucharski, F., Zeng, N., Kalnay, E. (2013). A further assessment of vegetation feedback on decadal Sahel rainfall variability. *Climate Dynamics*, 40(5-6), 1453–1466.
- Kummerow, C., Hong, Y., Olson, W. S., Yang, S., Adler, R. F., McCollum, J., ... Wilheit, T. T. (2001). The Evolution of the Goddard Profiling Algorithm (GPROF) for Rainfall Estimation from Passive Microwave Sensors. *Journal of Applied Meteorology*, 40(11), 1801–1820.
- Lampitey, B. L. (2008). Comparison of Gridded Multisatellite Rainfall Estimates with Gridded Gauge Rainfall over West Africa. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 47(1), 185–205.
- Latham, J., Cumani, R., Rosati, I., Bloise, M. (2014). *FAO Global Land Cover (GLC-SHARE) Beta-Release 1.0 Database*, Land and Water Division, 40.
- Le Houérou, H. N. (1984). Rain use efficiency: a unifying concept in arid-land ecology. *Journal of Arid Environments*, 7(3), 213–247.
- Lebel, T., Ali, A. (2009). Recent trends in the Central and Western Sahel rainfall regime (1990–2007). *Surface Processes and Water Cycle in West Africa, Studied from the AMMA-CATCH Observing System*, 375(1–2), 52–64.
- Lebel, T., Amani, A. (1999). Rainfall Estimation in the Sahel: What Is the Ground Truth? *Journal of Applied Meteorology*, 38(5), 555–568.
- Li, J., Lewis, J., Rowland, J., Tappan, G., Tieszen, L. . (2004). Evaluation of land performance in Senegal using multi-temporal NDVI and rainfall series. *Journal of Arid Environments*, 59(3), 463–480.

- Love, T. B., Kumar, V., Xie, P., Thiaw, W. (2004). A 20-year daily africa precipitation climatology using satellite and gauge data. In *14th Conf. on Applied Meteorology* (p. P5.4). Seattle: Amer. Meteor. Soc. Retrieved from <http://ams.confex.com/ams/pdfpapers/67484.pdf>
- Lu, J., Delworth, T. L. (2005). Oceanic forcing of the late 20th century Sahel drought. *Geophysical Research Letters*, 32(22), - L22706.
- Mahé, G., Paturel, J.-E. (2009). 1896–2006 Sahelian annual rainfall variability and runoff increase of Sahelian Rivers. *Comptes Rendus Geoscience*, 341(7), 538–546.
- Maidment, R. I., Grimes, D., Allan, R. P., Tarnavsky, E., Stringer, M., Hewison, T., ... Black, E. (2014). The 30 year TAMSAT African Rainfall Climatology And Time series (TARCAT) data set. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 119(18), 10,610–619,644.
- Maisongrande, P., Duchemin, B., Dedieu, G. (2004). VEGETATION/SPOT: an operational mission for the Earth monitoring; presentation of new standard products. *International Journal of Remote Sensing*, 25(1), 9–14.
- Mann, H. B. (1945). Nonparametric test against trend, 13, 245–259.
- Martín Vide, J. (1993). La Teoría de Catastrofes y la Geografía: aplicaciones en Climatología. *Revista de Geografía*, XXVII-XXVI, 21–32.
- Martín Vide, J. (2003). *El Tiempo y el clima* (p. 127). Barcelona: Rubes.
- Martín Vide, J. (2011). Estructura temporal fina y patrones espaciales de la precipitación en la España peninsular. *Memorias de La Real Academia de Ciencias Y Artes de Barcelona*, 1030, LXV, 3, 119–162.
- Martiny, N., Camberlin, P., Richard, Y., Philippon, N. (2006). Compared regimes of NDVI and rainfall in semi-arid regions of Africa. *International Journal of Remote Sensing*, 27(23), 5201–5223.
- Mas, J. F. (2011). *Aplicaciones del sensor MODIS para el monitoreo del territorio* (1st ed.). México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat).
- Mbow, C., Fensholt, R., Nielsen, T. T., Rasmussen, K. (2014). Advances in monitoring vegetation and land use dynamics in the Sahel. *Geografisk Tidsskrift-Danish Journal of Geography*, 114(1), 84–91.
- MDG Africa Steering Group. (2008). *Achieving the Millennium Development Goals In Africa. The 18th World Congress*
- Medlyn, B. E. (2011). Comment on “Drought-induced reduction in global terrestrial net primary production from 2000 through 2009”. *Science (New York, N.Y.)*, 333(6046), 1093.
- Meroni, M., Rembold, F., Verstraete, M., Gommès, R., Schucknecht, A., Beye, G. (2014). Investigating the Relationship between the Inter-Annual Variability of Satellite-Derived Vegetation Phenology and a Proxy of Biomass Production in the Sahel. *Remote Sensing*, 6(6), 5868–5884.
- Mitchell, T. D., Jones, P. D. (2005). An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids. *International Journal of Climatology*, 25(6), 693–712.

-
- Mohino, E., Janicot, S., Bader, J. (2011). Sahel rainfall and decadal to multi-decadal sea surface temperature variability. *Climate Dynamics*, 37(3-4), 419–440.
- Mohr, K. I., Thorncroft, C. D. (2006). Intense convective systems in West Africa and their relationship to the African easterly jet. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 132(614), 163–176.
- Mueller, T., Dressler, G., Tucker, C., Pinzon, J., Leimgruber, P., Dubayah, R., ... Fagan, W. (2014). Human Land-Use Practices Lead to Global Long-Term Increases in Photosynthetic Capacity. *Remote Sensing*, 6(6), 5717–5731.
- Murphy, A. H. (1995). The Coefficients of Correlation and Determination as Measures of performance in Forecast Verification. *Weather and Forecasting*, 10(4), 681–688.
- Neeti, N., Eastman, J. R. (2011). A Contextual Mann-Kendall Approach for the Assessment of Trend Significance in Image Time Series. *Transactions in GIS*, 15(5), 599–611.
- New, M., Hulme, M., Jones, P. (1999). Representing Twentieth-Century Space–Time Climate Variability. Part I: Development of a 1961–90 Mean Monthly Terrestrial Climatology. *Journal of Climate*, 12(3), 829–856.
- New, M., Hulme, M., Jones, P. (2000). Representing Twentieth-Century Space–Time Climate Variability. Part II: Development of 1901–96 Monthly Grids of Terrestrial Surface Climate. *Journal of Climate*, 13(13), 2217–2238.
- New, M., Todd, M., Hulme, M., Jones, P. (2001). Precipitation measurements and trends in the twentieth century. *International Journal of Climatology*, 21(15), 1889–1922.
- Nicholson, S. (2005). On the question of the “recovery” of the rains in the West African Sahel. *Journal of Arid Environments*, 63(3), 615–641.
- Nicholson, S., Davenport, M., Malo, A. (1990). A comparison of the vegetation response to rainfall in the Sahel and East Africa, using normalized difference vegetation index from NOAA AVHRR. *Climatic Change*, 17(2-3), 209–241.
- Nicholson, S. E. (1980). The Nature of Rainfall Fluctuations in Subtropical West Africa. *Monthly Weather Review*, 108(4), 473–487.
- Nicholson, S. E. (1993). An Overview of African Rainfall Fluctuations of the Last Decade. *Journal of Climate*, 6(7), 1463–1466.
- Nicholson, S. E. (2000). The nature of rainfall variability over Africa on time scales of decades to millenia. *Paleomonsoon Variations and Terrestrial Environmental Change*, 26(1–3), 137–158.
- Nicholson, S. E. (2009). A revised picture of the structure of the “monsoon” and land ITCZ over West Africa. *Climate Dynamics*, 32(7-8), 1155–1171.
- Nicholson, S. E. (2013). The West African Sahel: A Review of Recent Studies on the Rainfall Regime and Its Interannual Variability. *ISRN Meteorology*, 2013, 32.
- Nicholson, S. E., Dezfuli, A. K., Klotter, D. (2012a). A Two-Century Precipitation Dataset for the Continent of Africa. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(8), 1219–1231.

- Nicholson, S. E., Klotter, D., Dezfuli, A. K. (2012b). Spatial reconstruction of semi-quantitative precipitation fields over Africa during the nineteenth century from documentary evidence and gauge data. *Quaternary Research*, 78(1), 13–23.
- Nicholson, S. E., Some, B., McCollum, J., Nelkin, E., Klotter, D., Berte, Y., ... Traore, A. K. (2003). Validation of TRMM and Other Rainfall Estimates with a High-Density Gauge Dataset for West Africa. Part II: Validation of TRMM Rainfall Products. *Journal of Applied Meteorology*, 42(10), 1355–1368.
- Nicholson, S. E., Tucker, C. J., Ba, M. B. (1998). Desertification, Drought, and Surface Vegetation: An Example from the West African Sahel. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79(5), 815–829.
- Noel, T., Guedj, S., Chopin, F., Bergès, J. C., Desbois, M., Ali, A., ... Richard, Y. (2006). Products Validation, (December).
- Novella, N. S., Thiaw, W. M. (2013). African Rainfall Climatology Version 2 for Famine Early Warning Systems. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 52(3), 588–606.
- Olson, D. M., Dinerstein, E., Wikramanayake, E. D., Burgess, N. D., Powell, G. V. N., Underwood, E. C., ... Kassem, K. R. (2001). Terrestrial Ecoregions of the World: A New Map of Life on Earth: A new global map of terrestrial ecoregions provides an innovative tool for conserving biodiversity. *BioScience*, 51(11), 933–938.
- Olsson, L. (2005). A recent greening of the Sahel - Trends, patterns and potential causes. *Journal of Arid Environments*, 63(3), 556–566.
- Olsson, L., Eklundh, L., Ardö, J. (2005). A recent greening of the Sahel—trends, patterns and potential causes. *Journal of Arid Environments*, 63(3), 556–566.
- Open University. (1989). *Ocean Circulation*. Oxford: Pergamon. Retrieved from <http://www.open.ac.uk/libraryservices/beta/feeds/?id=480>
- OXFAM. (2012). Más de medio millón de personas afectadas en Níger por las peores inundaciones en 80 años. Retrieved from <http://www.oxfam.org/es/pressroom/pressrelease/2012-09-20/m%C3%A1s-de-medio-mill%C3%B3n-de-personas-afectadas-en-n%C3%ADger-por-las-peores->
- Palmer, T. N. (1986). Influence of the Atlantic, Pacific and Indian Oceans on Sahel rainfall. *Nature*, 322(6076), 251–253.
- Panthou, G., Vischel, T., Lebel, T. (2014). Recent trends in the regime of extreme rainfall in the Central Sahel. *International Journal of Climatology*, 4006(March), n/a–n/a.
- Panthou, G., Vischel, T., Lebel, T., Blanchet, J., Quantin, G., Ali, a. (2012). Extreme rainfall in West Africa: A regional modeling. *Water Resources Research*, 48(8), n/a–n/a.
- Peterson, T. C., Karl, T. R., Jamason, P. F., Knight, R., Easterling, D. R. (1998). First difference method: Maximizing station density for the calculation of long-term global temperature change. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 103(D20), 25967–25974.
- Pierre, C., Bergametti, G., Marticorena, B., Mougin, E., Lebel, T., Ali, A. (2011). Pluriannual comparisons of satellite-based rainfall products over the Sahelian belt for seasonal vegetation modeling. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 116(D18), D18201.
- Pinzon, J., Tucker, C. (2014). A Non-Stationary 1981–2012 AVHRR NDVI3g Time Series. *Remote Sensing*, 6(8), 6929–6960.

-
- Pitman, A. J., de Noblet-Ducoudré, N., Cruz, F. T., Davin, E. L., Bonan, G. B., Brovkin, V., ... Voldoire, A. (2009). Uncertainties in climate responses to past land cover change: First results from the LUCID intercomparison study. *Geophysical Research Letters*, 36(14), -L14814.
- Poccard, I., Janicot, S., Camberlin, P. (2000). Comparison of rainfall structures between NCEP/NCAR reanalyses and observed data over tropical Africa. *Climate Dynamics*. Springer Berlin / Heidelberg. doi:10.1007/s003820000087
- Pouliot, D., Latifovic, R., Olthof, I. (2009). Trends in vegetation NDVI from 1 km AVHRR data over Canada for the period 1985–2006. *International Journal of Remote Sensing*, 30(1), 149–168.
- Prince, S. D., Wessels, K. J., Tucker, C. J., Nicholson, S. E. (2007). Desertification in the Sahel: a reinterpretation of a reinterpretation. *Global Change Biology*, 13(7), 1308–1313.
- Ramachandran, B., Justice, C. O., Abrams, M. J. (Eds.). (2011). *Land Remote Sensing and Global Environmental Change. Land Remote Sensing and Global Environmental Change SE - 26* (Vol. 11, pp. 509–547). New York: Springer. doi:10.1007/978-1-4419-6749-7_26
- Reuters. (2013). Flash floods kill 24 in Mali's capital Bamako, minister says | Reuters. Retrieved September 22, 2013, from <http://www.reuters.com/article/2013/08/29/us-mali-floods-idUSBRE97S00I20130829>
- Roca, R., Chambon, P., Jobard, I., Kirstetter, P.-E., Gosset, M., Bergès, J. C. (2010). Comparing Satellite and Surface Rainfall Products over West Africa at Meteorologically Relevant Scales during the AMMA Campaign Using Error Estimates. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 49(4), 715–731.
- Rojas, O., Rembold, F., Delincé, J., Léo, O. (2011). Using the NDVI as auxiliary data for rapid quality assessment of rainfall estimates in Africa. *International Journal of Remote Sensing*, 32(12), 3249–3265.
- Rouse JR, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., Deering, D. W. (1973). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In *Proceedings of the 3rd Earth Resources Technology Satellite-I Symposium* (pp. 309–317). Washington, DC: USA.
- Rowell, D. P. (2001). Teleconnections between the tropical Pacific and the Sahel. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 127(575), 1683–1706.
- Rowell, D. P. (2003). The Impact of Mediterranean SSTs on the Sahelian Rainfall Season. *Journal of Climate*, 16(5), 849–862.
- Rowell, D. P. (2013). Simulating SST Teleconnections to Africa: What is the State of the Art? *Journal of Climate*, 26(15), 5397–5418.
- Rudolf, B., Hauschild, H., Rueth, W., Schneider, U. (1994). Terrestrial Precipitation Analysis: Operational Method and Required Density of Point Measurements. In M. Desbois & F. Désalmand (Eds.), *Global Precipitations and Climate Change SE - 10* (Vol. 26, pp. 173–186). Springer Berlin Heidelberg. doi:10.1007/978-3-642-79268-7_10
- Samanta, A., Ganguly, S., Hashimoto, H., Devadiga, S., Vermote, E., Knyazikhin, Y., ... Myneni, R. B. (2010). Amazon forests did not green-up during the 2005 drought. *Geophysical Research Letters*, 37(5), n/a–n/a.
- Samanta, A., Ganguly, S., Vermote, E., Nemani, R. R., Myneni, R. B. (2012). Why Is Remote Sensing of Amazon Forest Greenness So Challenging? *Earth Interactions*, 16(7), 1–14.

- Scheftic, W., Zeng, X., Broxton, P., Brunke, M. (2014). Intercomparison of Seven NDVI Products over the United States and Mexico. *Remote Sensing*, 6(2), 1057–1084.
- Schneider, U., Becker, A., Finger, P., Meyer-Christoffer, A., Ziese, M., Rudolf, B. (2013). GPCP's new land surface precipitation climatology based on quality-controlled in situ data and its role in quantifying the global water cycle. *Theoretical and Applied Climatology*, 1–26.
- Seaquist, J. W., Hickler, T., Eklundh, L., Ardo, J., Heumann, B. W. (2009). Disentangling the effects of climate and people on Sahel vegetation dynamics. *Biogeosciences*, 6(3), 469–477.
- SRI. (2012). Sahel Rainfall Index. doi:10.6069/H5MW2F2Q
- Storch, H. Von, Zwiers, F. (1999). *Statistical analysis in climate research* (p. 484). Cambridge University Press.
- Swinnen, E., Verbeiren, S., Deronde, B., Henry, P. (2014). Assessment of the impact of the orbital drift of SPOT-VGT1 by comparison with SPOT-VGT2 data. *International Journal of Remote Sensing*, 35(7), 2421–2439.
- Tapiador, F. J., Angelis, C. F., Viltard, N., Cuartero, F., de Castro, M. (2011). On the suitability of regional climate models for reconstructing climatologies. *International Conference on Nucleation and Atmospheric Aerosols (Part 2) ICNAA 2009*, 101(3), 739–751.
- Tarnavsky, E., Grimes, D., Maidment, R., Black, E., Allan, R. P., Stringer, M., ... Kayitakire, F. (2014). Extension of the TAMSAT Satellite-Based Rainfall Monitoring over Africa and from 1983 to Present. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 53(12), 2805–2822.
- Taylor, C. C. M., Lambin, E. F. E., Stephenne, N., Harding, R. J., Essery, R. L. H. (2002). The Influence of Land Use Change on Climate in the Sahel. *Journal of Climate*, 15(24), 3615–3629.
- Tschakert, P., Sagoe, R., Ofori-Darko, G., Codjoe, S. N. (2010). Floods in the Sahel: an analysis of anomalies, memory, and anticipatory learning. *Climatic Change*, 103(3-4), 471–502.
- Tucker, C. J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8(2), 127–150.
- Tucker, C. J., Dregne, H. E., Newcomb, W. W. (1991). Expansion and Contraction of the Sahara Desert from 1980 to 1990. *Science*, 253(5017), 299–300.
- Tucker, C. J., Pinzon, J. E., Brown, M. E., Slayback, D. A., Pak, E. W., Mahoney, R., ... El Saleous, N. (2005). An extended AVHRR 8-km NDVI dataset compatible with MODIS and SPOT vegetation NDVI data. *International Journal of Remote Sensing*, 26(20), 4485–4498.
- UNECA, AUC. (2011). *Economic Report on Africa 2011: Governing Development in Africa – The Role of the State in Economic Transformation* (p. 130). UNECA, Addis Ababa, Ethiopia.
- Van Leeuwen, W., Hartfield, K., Miranda, M., Meza, F. (2013). Trends and ENSO/AAO Driven Variability in NDVI Derived Productivity and Phenology alongside the Andes Mountains. *Remote Sensing*, 5(3), 1177–1203.

-
- Vizy, E. K., Cook, K. H. (2001). Mechanisms by Which Gulf of Guinea and Eastern North Atlantic Sea Surface Temperature Anomalies Can Influence African Rainfall. *Journal of Climate*, 14(5), 795–821.
- Von Neumann, J. (1941). Distribution of the ratio of the mean square successive difference to the variance. *Ann.Math.Stat.*, 12, 367–395.
- Vrieling, A., de Leeuw, J., Said, M. (2013). Length of Growing Period over Africa: Variability and Trends from 30 Years of NDVI Time Series. *Remote Sensing*, 5(2), 982–1000.
- Wang, N.-Y., Liu, C., Ferraro, R., Wolff, D., Zipser, E., Kummerow, C. (2009). TRMM 2A12 Land Precipitation Product - Status and Future Plans. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 87A, 237–253.
- Wilks, D. S. (2006). *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences* (Vol. Volume 59, p. 464). Academic Press. doi:10.1016/S0074-6142(06)80039-2
- Willmott, C. J., Rowe, C. M., Philpot, W. D. (1985). Small-Scale Climate Maps: A Sensitivity Analysis of Some Common Assumptions Associated with Grid-Point Interpolation and Contouring. *The American Cartographer*, 12(1), 5–16.
- WMO. (2005). *World Weather Watch. Twenty-second satatus report on implementation*. (S. of the W. M. Organization, Ed.) (Vol. WMO-No. 98). Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization.
- WMO Space Programme. (2014). Satellit estatus. Retrieved January 29, 2014, from <http://www.wmo.int/pages/prog/sat/satellitestatus.php>
- WWF Ecoregions. (2000). Terrestrial Ecoregions | Biome Categories | WWF. Retrieved January 29, 2014, from <http://www.worldwildlife.org/biome-categories/terrestrial-ecoregions>
- Xie, P., Arkin, P. A. (1996). Analyses of Global Monthly Precipitation Using Gauge Observations, Satellite Estimates, and Numerical Model Predictions. *Journal of Climate*, 9(4), 840–858.
- Xue, Y., Shukla, J. (1993). The Influence of Land Surface Properties on Sahel Climate. Part 1: Desertification. *Journal of Climate*, 6(12), 2232–2245.
- Zhang, C., Woodworth, P., Gu, G. (2006). The seasonal cycle in the lower troposphere over West Africa from sounding observations. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 132(621), 2559–2582.
- Zhao, M., Running, S. W. (2010). Drought-induced reduction in global terrestrial net primary production from 2000 through 2009. *Science (New York, N.Y.)*, 329(5994), 940–3.
- Zhou, L., Tucker, J., Kaufmann, K., Myneni, B., America, N. (2001). Variations in northern vegetation activity inferred from satellite data of vegetation index during 1981 to 1999 Liming I Compton I Daniel V . Shabanov , I and Ranga plateau , where almost and, 106.